

# **VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS, AGROFLORESTAIS E ALIMENTARES ATRAVÉS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM**

## **CASO DE ESTUDO TAPADA DA AJUDA**

**Ana Luísa dos Santos Pereira**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia do Ambiente**

Orientadora: Doutora Ana Cristina Ferreira da Cunha Queda

**Júri:**

Presidente: Doutora Elizabeth da Costa Neves Fernandes de Almeida Duarte, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Doutora Ana Cristina Ferreira da Cunha Queda, Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Doutora Rita do Amaral Fragoso, Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

*“If something is important enough you should try,  
even if the probable outcome is a failure”*

Elon Musk

## Agradecimentos

À minha orientadora, a Professora Doutora Ana Cristina Ferreira da Cunha Queda, do Departamento de Ciências e Engenharia de Biossistemas, do Instituto Superior de Agronomia, pela ajuda, dedicação e orientação na elaboração deste trabalho.

À Engenheira Marie-Christine Morais pelas horas despendidas no laboratório para a ajuda e orientação deste trabalho, fundamentais para a análise das amostras recolhidas.

À Mãe, por ser a pessoa que tornou todo este percurso possível, pelo esforço, pela dedicação, pela compreensão, pela enorme paciência, por ser mãe e por ser pai, por estar sempre ao meu lado onde quer que esteja, pelo amor incondicional, e por tudo aquilo que as palavras não chegam para descrever. À Avó, o meu anjinho da guarda.

Ao Zé, pela paciência, por ser um chato no bom sentido e por ser o melhor padraсто que poderia ter, aos Avós, por todos os almoços nas horas mais apertadas e pela ajuda com “qualquer coisinha” que fosse necessária, aos Tios por estarem presentes neste período académico, e em especial ao Tio, por estar sempre naqueles mesmo importantes, e ao Filipe, por compreender que a Pi tinha sempre coisas para fazer e estava sempre ocupada.

À Bárbara, por ser a minha pessoa, por ter sido incansável na ajuda da elaboração quer desta tese como de todas as dezenas de trabalhos e apresentações que fizemos juntas, por ser a companhia durante as aulas e fora delas, pelas boleias, pelas noitadas e pela amizade.

À Nádia pela companhia no laboratório e pelos banhos de esguicho. Ao Rick, pela ajuda na parte estatística, à Cátia e ao Mata pela companhia ao almoço e nos cafés no Paulo, que se estendiam por horas exageradas, e à Joana, pela parvoeira e pela preocupação constante.

À Rita, por ser uma amiga de infância, dos jogos e das dietas, e, mais recentemente, dos gráficos.

## Resumo

Numa altura em que a produção de resíduos aumenta proporcionalmente com o aumento da população e com o desenvolvimento económico, é de extrema importância que não só se reduza a quantidade de resíduos produzidos como se desenvolvam técnicas cada vez mais eficientes para o tratamento destes, encarando-os como um recurso. Adicionalmente, de modo a diminuir custos inerentes a transportes, seria ainda mais vantajoso utilizar este novo recurso *in situ*.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a evolução de um processo de compostagem com duas misturas de resíduos orgânicos biodegradáveis provenientes da Tapada da Ajuda, através da determinação de parâmetros químicos, físico-químicos, microbiológicos e enzimáticos das biomassas em compostagem, recolhidas ao longo do processo.

Os resultados obtidos demonstraram que ambas as pilhas evoluíram de forma semelhante em termos de temperatura, tendo, no entanto, diferindo bastante nos restantes parâmetros. A dinâmica da população de microrganismos e a atividade enzimática esteve relacionada com as transformações físico-químicas e químicas. No que respeita à estabilidade da matéria orgânica, ambos os compostos se encontram estabilizados.

**Palavras-chave:** Compostagem; Resíduos Orgânicos; Valorização de Resíduos; Microrganismos; Atividade Enzimática

## Abstract

At a time when the production of waste increases proportionally with the increase of population and economic development, it is of extreme importance that not only we reduce the amount of waste generated, but also make progresses for more efficient techniques, in order to treat them and facing it as a resource. Additionally, in order to decrease transport costs involved, it would be even more desirable to use this product *in situ*.

This study aimed to assess the development of a composting process with different mixtures of biodegradable organic waste, by the determination of chemical, physico-chemical, microbiological and enzymatic parameters, throughout the process.

The results showed that both piles progressed similarly in terms of temperature, but differs significantly in other parameters. The profile of the evolution of microorganisms and the enzymatic activity were related to the physico-chemical and chemical transformations. For the stability of organic matter, both composts were stabilized.

**Keywords:** Composting; Organic Waste; Waste Recovery; Microorganisms; Enzymatic activity

## Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>3</b>
2.1. A Compostagem em Portugal.....	3
2.1.1. Metas Nacionais .....	6
2.2. Conceitos de Compostagem.....	7
2.3. Objetivos, Vantagens e Desvantagens .....	9
2.4. Os Processos de Compostagem.....	11
2.4.1. Resíduos Orgânicos Biodegradáveis .....	11
2.4.2. Dinâmica do Processo .....	12
2.4.3. Duração do Processo de Compostagem.....	15
2.5. Evolução dos parâmetros.....	15
2.5.1. Temperatura .....	15
2.5.2. pH.....	18
2.5.3. Teor de Humidade .....	19
2.5.4. Matéria Orgânica e Disponibilidade de Nutrientes .....	20
2.5.5. Relação C/N .....	22
2.5.6. Granulometria do Material.....	23
2.5.7. Arejamento e Disponibilidade de Oxigénio.....	23
2.6. Dinâmica do Azoto.....	25
2.7. Populações Microbianas e a sua Dinâmica na Compostagem .....	26
2.8. Atividades Enzimáticas Durante o Processo de Compostagem .....	28
2.9. Qualidade dos Compostos .....	29
2.9.1. Avaliação da Estabilização/Maturação dos Compostos.....	30
<b>Capítulo 3 – Materiais e Métodos .....</b>	<b>33</b>
3.1. Descrição da Tapada da Ajuda .....	33
3.2. Biomassas Utilizadas no Processo.....	34
3.3. Caracterização do Processo de Compostagem e Evolução .....	38
3.4. Métodos de Análise.....	39
3.4.1. Parâmetros Físicos e Físico-Químicos .....	39
3.4.2. Parâmetros Químicos .....	40
3.4.3. Métodos Para Determinar As Atividades Enzimáticas .....	42
3.4.4. Parâmetros Microbiológicos.....	43

3.4.5. Avaliação Da Estabilidade/Maturação.....	44
3.5. Análise Estatística Dos Resultados .....	45
<b>Capítulo 4 – Análise e Discussão de Resultados.....</b>	<b>47</b>
<b>Capítulo 5 – Conclusões e Perspetivas Futuras .....</b>	<b>61</b>
<b>Capítulo 6 – Referências Bibliográficas.....</b>	<b>63</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> - Produção e captação de resíduos urbanos em Portugal Continental (APA, 2015)	4
<b>Figura 2</b> - RU encaminhados diretamente para as diversas operações de gestão, em 2010 e 2014, em Portugal Continental (APA, 2015) .....	5
<b>Figura 3</b> - Centrais de valorização orgânica (CVO) e estações de tratamento mecânico e biológico (TMB) em Portugal Continental .....	5
<b>Figura 4</b> - Esquema do processo de compostagem (Vallini, 1995b) .....	12
<b>Figura 5</b> - Condicionamento de uma biomassa com um agente de suporte e um agente condicionante (Vallini, 1995b).....	13
<b>Figura 6</b> - Esquema simplificado da evolução de um processo de compostagem (Mustin, 1987).....	14
<b>Figura 7</b> - Evolução da temperatura e do pH durante a compostagem (López-Real, 1995) .	16
<b>Figura 8</b> - Perfil típico de temperatura numa pilha de compostagem (Russo, 2003) .....	18
<b>Figura 9</b> - Curva das variações de pH durante a compostagem (Mustin, 1987) .....	19
<b>Figura 10</b> - Curva teórica das necessidades em oxigénio durante o processo de compostagem (Mustin, 1987) .....	24
<b>Figura 11</b> - Dinâmica do azoto no processo de compostagem (Cunha-Queda, 1999) .....	26
<b>Figura 12</b> - Pormenor do Instituto Superior de Agronomia e sua vinha .....	34
<b>Figura 13</b> - Evolução da temperatura na pilha MB .....	47
<b>Figura 14</b> - Evolução da temperatura na pilha MBE .....	48
<b>Figura 15</b> - Evolução da temperatura média das duas pilhas.....	49
<b>Figura 16</b> - Pormenor das sementes germinadas nas pilhas .....	50
<b>Figura 17</b> - Pormenor da segunda germinação das sementes nas pilhas .....	50
<b>Figura 18</b> - Pormenor dos macrorganismos observados na pilha MB (esquerda) e na MBE (direita) .....	57
<b>Figura 19</b> - Pormenor da formação de basidiomicetas na pilha MBE .....	59



## Índice de tabelas

<b>Tabela 1</b> - Quantitativos de composto produzido (t) .....	6
<b>Tabela 2</b> - Classes de estabilidade para compostos (Laga-Merkblatt M10, 1995).....	32
<b>Tabela 3</b> - Caracterização físico-química dos materiais primários.....	36
<b>Tabela 4</b> - Caracterização físico-química dos materiais condicionantes.....	37
<b>Tabela 5</b> - Caracterização físico-química dos materiais de suporte .....	37
<b>Tabela 6</b> - Quantidades utilizadas de biomassa nas pilhas .....	38
<b>Tabela 7</b> - Parâmetros analisados para cada pilha .....	39
<b>Tabela 8</b> - Constituição do meio Nutrient .....	44
<b>Tabela 9</b> - Constituição do meio extrato de malte .....	44
<b>Tabela 10</b> - Valores dos parâmetros físico-químicos da pilha MB .....	51
<b>Tabela 11</b> - Valores dos parâmetros físico-químicos da pilha MBE.....	53
<b>Tabela 12</b> - Interação entre os compostos finais das duas pilhas .....	54
<b>Tabela 13</b> - Evolução da atividade microbiológica nas pilhas MB e MBE .....	56
<b>Tabela 14</b> - Valores da atividade enzimática das pilhas MB e MBE .....	58

## **Lista de abreviaturas**

**APA** – Agência Portuguesa do Ambiente

**CVO** – Central de Valorização Orgânica

**ERSUC** – Resíduos Sólidos do Centro S.A.

**GEE** – Gases de Efeito de Estufa

**MB** – Mistura Base

**MBE** – Mistura Base + Estrume

**PERSU II** – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

**RARU** – Relatório Anual de Resíduos Urbanos

**ROB's** – Resíduos Orgânicos Biodegradáveis

**RSU** – Resíduos sólidos Urbanos

**RU** – Resíduos Urbanos

**TM** – Tratamento Mecânico

**TMB** – Tratamento Mecânico e Biológico



## Capítulo 1 – Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento populacional e o comportamento dos consumidores, relacionado com o aumento da sua qualidade de vida e da riqueza da sociedade, facilitaram quer o aumento quer a diversidade da produção de resíduos. Assim sendo, os resíduos constituem um desafio ambiental, social e económico para as sociedades modernas, que enfrentam um grave problema de acumulação de resíduos, o que motiva a uma urgente definição de tecnologias e ações políticas de modo a solucionar este problema.

Atualmente, os resíduos devem ser considerados cada vez mais um recurso importante para a indústria, por isso, o paradigma da gestão dos mesmos deve convencionar modos de produção que permitam a redução de resíduos e a fácil reutilização e/ou reciclagem, aumentando o seu valor como recurso disponível para reentrar no ciclo de produção de bens, de modo a satisfazer as necessidades humanas, em vez de ser um resíduo poluidor e ambientalmente insustentável para gerações futuras.

Apesar dos progressos realizados, o volume de resíduos continua a aumentar e a quantidade que é depositada em aterro não tende a diminuir, sendo a sua produção maioritariamente pela geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Em Portugal, a atividade agrícola produz quantidades significativas de resíduos, nomeadamente restos da atividade agrícola, florestal e agroindustrial (Cunha-Queda *et al.*, 2005).

De modo a dissociar o crescimento económico do consumo de materiais e da produção de resíduos, bem como aumentar a integração de resíduos na economia, a União Europeia pauta-se por legislação que visa controlar o ciclo de vida do resíduo, desde a produção até à eliminação, destacando a reciclagem e a valorização sempre que possível, reduzindo os fluxos que se depositam em aterro.

O Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU II) estabelece, para o período de 2007-2016, a minimização do uso da deposição em aterro dos RSU, implementando as melhores técnicas de gestão, com vista a maximizar a reciclagem, assim como outras formas de valorização.

Deste modo, os RSU, contendo na sua composição resíduos orgânicos biodegradáveis (ROB), podem ser valorizados, sendo a compostagem uma solução apropriada que permite reduzir os custos com a deposição em aterro, bem como pelo facto de produzir um corretivo orgânico com valor para a utilização em solos com baixo teor de matéria orgânica e nutrientes, ao mesmo tempo tendo em conta a proteção da qualidade dos solos, das águas subterrâneas e superficiais, bem como da saúde humana e dos animais.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a evolução do processo de compostagem com diferentes misturas de resíduos orgânicos biodegradáveis provenientes da Tapada da Ajuda. Foram realizadas recolhas periódicas das biomassas em compostagem, sendo analisados diversos parâmetros químicos, físico-químicos, microbiológicos e enzimáticos das mesmas, com o objetivo de estudar o comportamento das diferentes misturas de resíduos orgânicos biodegradáveis ao longo da evolução do processo de compostagem.

## Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

### 2.1. A Compostagem em Portugal

Nos dias de hoje, a economia assenta num elevado nível de consumo de recursos que, após utilizados, originam resíduos. Enquanto no passado se procurava eliminar os resíduos, atualmente estes são encarados cada vez mais como um recurso, procurando promover-se a sua reciclagem, recuperação e utilização como matéria-prima, em detrimento da tradicional deposição em aterro.

De forma geral, os cidadãos desconhecem o potencial do resíduo enquanto recurso. No entanto, a proteção destes, nomeadamente através da prevenção da produção de resíduos, é cada vez mais um princípio de máxima importância na sociedade, a qual deverá ser parte ativa e responsável no processo de gestão (APA, 2014).

Assim, a mudança de paradigma nas políticas em matéria de resíduos foi cada vez mais acentuada, culminando com o 7º Programa Comunitário de Ação, onde a política de resíduos passa assumidamente a fazer parte das políticas orientadas para os recursos naturais, adotando como objetivo transformar os resíduos em recursos. A política ambiental europeia baseia-se então nos princípios da precaução, da prevenção, da correção da poluição na fonte, e no princípio do «poluidor-pagador».

O Plano Nacional de Gestão de Resíduos, é um instrumento de planeamento macro da política de resíduos, que estabelece as orientações estratégicas, de âmbito nacional, de prevenção e gestão de resíduos, no sentido da concretização dos princípios enunciados na legislação comunitária e nacional, numa ótica de proteção do ambiente e desenvolvimento do País. Este plano visa promover uma política de resíduos integrada no ciclo de vida dos produtos, centrada numa economia tendencialmente circular e que garanta uma maior eficiência na utilização dos recursos naturais, assentando em dois objetivos estratégicos basilares: promover a eficiência da utilização de recursos naturais na economia e prevenir ou reduzir os impactes adversos decorrentes da produção e gestão de resíduos. Institui ainda as responsabilidades de gestão dos resíduos a determinadas entidades, sendo que a gestão dos RSU cabe aos municípios e a dos resíduos agrícolas cabe ao produtor.

Neste propósito, a transição de um modelo linear de produção de bens (extração de matéria-prima, produção, uso e descarte dos produtos) para um modelo circular, onde os materiais são devolvidos ao ciclo produtivo através da reutilização, recuperação e reciclagem, define o que se pretende com o conceito de economia circular.

A Diretiva 1999/31/CE do Conselho, de 26 de abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterro, vem definir Resíduo Sólido Urbano (RSU) como “os resíduos provenientes

das habitações privadas bem como os resíduos que, pela sua natureza ou composição, sejam semelhantes aos resíduos provenientes das habitações”.

Em Portugal, o Decreto-Lei 103-2015 de 15 de junho vem definir resíduo como “qualquer substância ou objeto do qual o detentor se desfaz, ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer, nomeadamente, os identificados na Lista Europeia de Resíduos”. Define ainda como resíduos verdes, os resíduos de composição vegetal provenientes de jardins, parques, florestas ou similares e como resíduos biodegradáveis, os resíduos que podem ser sujeitos a decomposição anaeróbia ou aeróbia, designadamente, os resíduos alimentares, os de jardim, o papel e o cartão.

No ano de 2014, a produção total de resíduos urbanos em Portugal continental foi de aproximadamente 4 474 milhões de toneladas, o que corresponde a uma capitação anual de 452 kg/(hab.ano), ou seja, uma produção diária de Resíduos Urbanos (RU) de 1,24 kg por habitante. Estes valores representam um aumento de cerca de 2,5 %, em milhões de toneladas, e 3 % em capitação, em relação ao ano anterior, invertendo-se a tendência que se verificava desde 2010, como se verifica na figura 1:

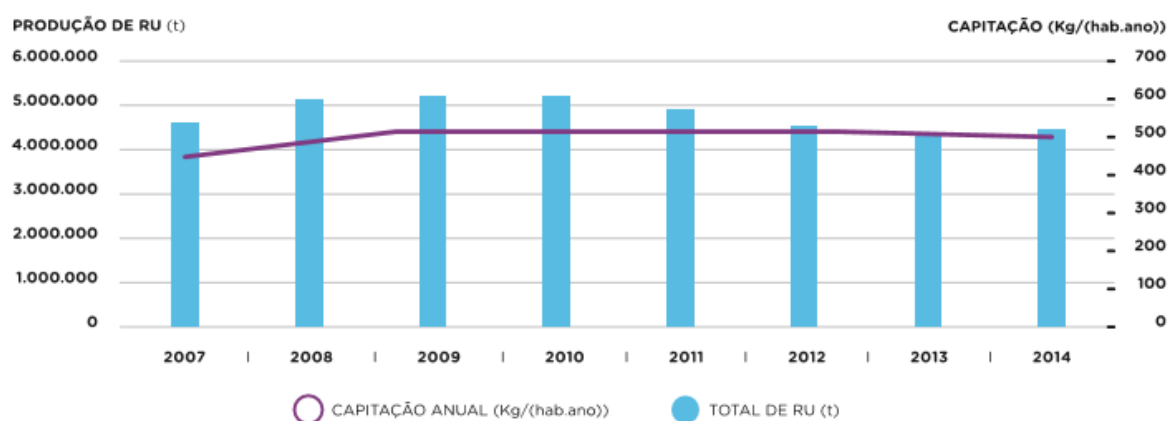


Figura 1 - Produção e capitação de resíduos urbanos em Portugal Continental (APA, 2015)

No mesmo ano, a recolha seletiva de resíduos urbanos em Portugal Continental atingiu os 62 kg/(hab.ano), o que é um valor muito inferior à produção total anual, sendo que os restantes resíduos provêm de recolha indiferenciada.

Também no mesmo ano, os RU produzidos em Portugal continental foram sujeitos às seguintes operações de gestão: 42 % de deposição em aterro, 19 % de valorização energética, 19 % de tratamento mecânico e biológico (TMB), 9 % de valorização material, 9 % de tratamento mecânico e 2 % de valorização orgânica (figura 2).

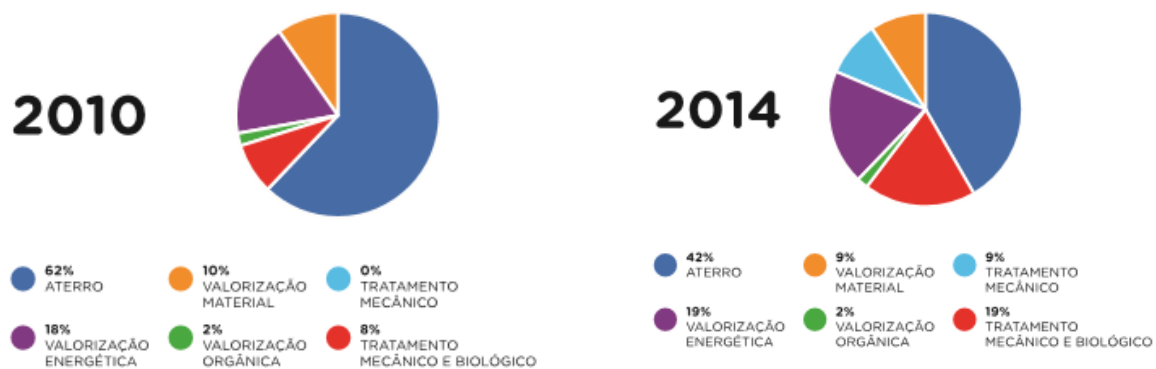


Figura 2 - RU encaminhados diretamente para as diversas operações de gestão, em 2010 e 2014, em Portugal Continental (APA, 2015)

Um dos objetivos a nível nacional para os RSU, estabelecidos pelo PERSU II (2007-2016) é a valorização dos resíduos urbanos biodegradáveis, evitando o aterro como destino final.

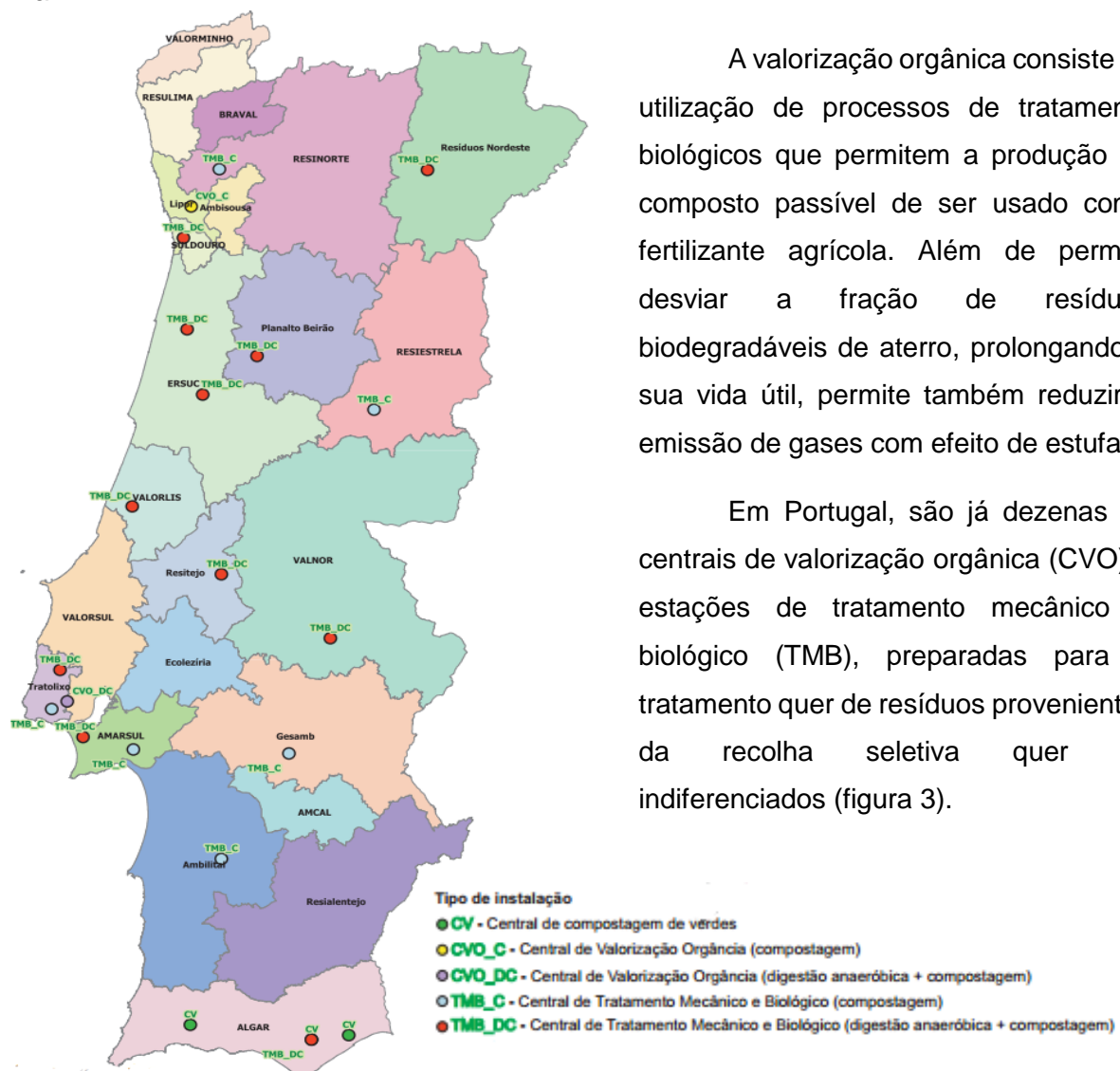


Figura 3 - Centrais de valorização orgânica (CVO) e estações de tratamento mecânico e biológico (TMB) em Portugal Continental



A reciclagem está em grande medida associada à recolha seletiva de diversos materiais como plásticos, vidros, metais ou papel e cartão. No entanto, embora desejavelmente a recolha seletiva deva ser a principal forma de obtenção destes materiais, existem outras vias que permitem recuperá-los a partir dos resíduos recolhidos indiferenciadamente. Esta evolução deveu-se à entrada em funcionamento de unidades de tratamento mecânico e biológico (TMB) e tratamento mecânico (TM) que promoveram o incremento das quantidades de resíduos encaminhados para valorização multimaterial.

No que respeita à quantidade de composto produzido, proveniente dos RU, ocorreu em 2014 uma ligeira recuperação dos quantitativos de composto produzido face ao ano anterior, que não atingem ainda os valores de 2011 (Tabela 1).

*Tabela 1 - Quantitativos de composto produzido (t)*

<b>Produção de composto a partir de...</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
RUB recolha seletiva	13 093	11 817	13 005	13 273	14 737
RUB recolha indiferenciada	35 607	54 718	43 488	47 558	48 427
<b>Total</b>	<b>48 701</b>	<b>66 535</b>	<b>56 493</b>	<b>60 831</b>	<b>63 164</b>

### 2.1.1. Metas Nacionais

O PERSU 2020 estabelece quatro metas nacionais, duas das quais resultam diretamente de metas comunitárias aplicáveis à totalidade do território Nacional (RARU, 2014).

No que respeita à produção de resíduos por habitante, pretende-se, até dezembro de 2020, uma redução mínima de 10 % em peso, relativamente ao valor de 2012. A APA calculou que em 2014, se tinha obtido apenas uma redução per capita de 0,49 %. Será assim necessário apostar, ainda mais, em medidas de prevenção de resíduos, sendo que o PERSU 2020 define ações que visam atingir este fim.

Relativamente à meta para RUB depositados em aterro, pretende-se uma redução para 35 % face aos quantitativos totais produzidos em 1995. Em 2014 verifica-se uma estabilização da quantidade de RUB depositado em aterro. A entrada em funcionamento de novas instalações de TM e TMB permitiu uma redução para 52 % dos RUB depositados em aterro face aos valores de 1995, tendo sido praticamente atingida a meta que estava estabelecida em 2013.

As metas discutidas acima são apenas algumas das previstas no PERSU 2020, sendo que Portugal tem ainda um longo caminho a percorrer para as atingir, e cada vez menos tempo para o fazer.

## 2.2. Conceitos de Compostagem

Uma definição global e definitiva do que é a compostagem é algo que não existe, muito embora inúmeras sejam as contribuições de vários especialistas para encontrar um conceito único. Quer sejam mais descritivas ou mais sucintas, são destacadas aqui algumas.

O Decreto-Lei n.º 103/2015 define Compostagem como “a degradação biológica aeróbia dos resíduos orgânicos até à sua estabilização, produzindo uma substância húmica, designada por composto, utilizável como corretivo orgânico do solo”.

Uma das primeiras definições surge por Haug (1980), que define compostagem como sendo um processo biológico de decomposição e estabilização de substratos orgânicos sob condições favoráveis ao desenvolvimento de temperaturas termófilas, resultando na produção de calor por via biológica, para produzir um produto final estável, livre de microrganismos patogénicos e de sementes de ervas daninhas, que pode ser aplicado em benefício dos solos.

De forma mais sucinta, Golueke (1981) define compostagem como um processo biológico controlado, no qual ocorre a estabilização de substratos biodegradáveis, resultando num produto semelhante a húmus, o qual pode ser utilizado como fertilizante e corretivo dos solos.

Acrescentando mais às definições anteriores, Zucconi e De Bertoldi (1987) definem compostagem como sendo um processo oxidante e controlado de substratos orgânicos, no qual ocorre uma fase termófila e a libertação temporária de fitotoxinas, com produção final de dióxido de carbono, vapor de água, elementos minerais e matéria orgânica estabilizada.

No âmbito da biotecnologia ambiental, Vallini (1995a) define o processo, como sendo um processo biooxidante (que ocorre apenas na presença de oxigénio molecular), exotérmico, promovido por microrganismos (bactérias, actinomicetas, fungos) naturalmente associados aos substratos a compostar, no qual a biomassa heterogénea putrescível sofre num curto espaço de tempo, profundas transformações físico-químicas, com perda da putrescibilidade, ocorrendo paralelamente a mineralização e a humificação parciais da matéria orgânica.

Mais tarde, Cunha-Queda (1999) incorpora os conceitos anteriores e define a compostagem como um processo controlado de biooxidação de substratos heterogéneos biodegradáveis, resultante da ação dos microrganismos (bactérias, actinomicetas e fungos) naturalmente associados aos substratos, durante o qual ocorre uma fase termófila, a libertação temporária de substâncias com efeito fitotóxico e a biomassa sofre profundas

transformações (mineralização e humificação parciais), sendo o principal produto final, designado “composto”, estável, higienizado e homogêneo.

Piedade *et al.* (2010) define que o processo de compostagem consiste no aproveitamento do potencial reciclável da matéria orgânica, constituindo-se assim como uma forma de valorização orgânica. Esta valorização consiste na recuperação da fração biodegradável dos resíduos sólidos que, após decomposição biológica por via aeróbia, origina um produto final estabilizado, inócuo, num estado de total ou parcial humificação que permite a sua introdução no solo de forma fitocompatível e é designado por composto. Acrescenta ainda que este processo é caracterizado pelo desenvolvimento rápido da população microbiana presente nos resíduos, com forte metabolismo, que provoca a elevação da temperatura da massa a compostar.

No que diz respeito ao composto, que provém da palavra inglesa *compost*, define-se como uma mistura de substâncias orgânicas com resíduos de origem vegetal, animal, etc., em processo de humificação (Cunha-Queda 1999).

O Decreto-Lei n.º 103/2015 define composto ou compostado como “o produto higienizado e estabilizado, resultante da decomposição da matéria orgânica por compostagem, cujas características são de molde a beneficiar, direta ou indiretamente, o crescimento das plantas”.

Zucconi e De Bertoldi (1987) definem composto como o produto estabilizado e higienizado, resultante do processo de compostagem, que é benéfico para o crescimento das plantas e que sofreu uma rápida decomposição seguida de um processo de humificação.

Vallini (1995a) refere-se a composto como o produto resultante da estabilização biológica de resíduos orgânicos fermentescíveis em condições oxidantes (aeróbias) que garantem à matriz em transformação a passagem espontânea por uma fase termófila.

Apesar de serem semelhantes, a definição avançada por este último dá mais ênfase à estabilização, não se referindo diretamente à maturação. Esta acaba por ser mais abrangente, se considerarmos a compostagem como forma de tratamento de resíduos, com vista à sua estabilização, e não apenas à produção de corretivo orgânico para a agricultura.

Ainda segundo Vallini (1995a), o principal objetivo do processo de compostagem é a obtenção de um produto estável, que não seja suscetível de repentina evolução biológica, maturado, e que seja compatível (não fitotóxico) com o emprego na agricultura como corretivo orgânico dos solos. Deve também permitir a eliminação de maus odores, a redução de volume e de massa, e a desativação de microrganismos patogénicos (higienização) da matriz inicial.

De acordo com Martinho *et al.* (2000), um composto de boa qualidade caracteriza-se por ser rico em matéria orgânica, mantendo ou aumentando as reservas de húmus, necessárias à manutenção ou melhoria das propriedades do solo como estrutura; deve ter capacidade de conservar a humidade; fornecer às plantas, a uma taxa adequada, nutrientes primários como azoto, fósforo, potássio e um grande número de microelementos; permitir a diminuição do uso de fertilizantes comerciais; reduzir o potencial poluidor da agricultura intensiva, devido à introdução de nutrientes no solo num estado químico que limita a sua solubilidade e consequente arrastamento.

No que diz respeito à agricultura, o composto constitui uma fonte de matéria orgânica devidamente estabilizada para os solos. Visto que a maioria dos solos nacionais apresentam teores abaixo dos níveis críticos neste componente, a aplicação de compostos tem especial interesse e pode substituir parcialmente a turfa na formulação de suportes das culturas. O composto maturado pode ainda ser utilizado em solos destinados a culturas arbóreas e arbustivas, culturas arvenses, pastagens, floricultura e horticultura; em casos onde o espalhamento e a incorporação sejam efetuados num período inferior a três semanas antes da sementeira ou plantação e ainda em certas culturas já implantadas em que o composto possa contactar com as raízes como, por exemplo, em prados, pastagens, pomares e relvados (Anónimo, 2008).

### 2.3. Objetivos, Vantagens e Desvantagens

O processo de compostagem pode ser considerado segundo duas perspetivas: como um processo orientado para a produção de compostos com interesse agrícola e como um processo orientado para o tratamento de resíduos (Vallini, 1995).

Segundo Russo (2003), os principais objetivos da compostagem passam pelo facto de o processo proporcionar uma boa destruição dos microrganismos patogénicos e estabilizar a matéria orgânica.

O mesmo autor refere que é um processo eficaz de reciclagem da fração putrescível dos resíduos sólidos urbanos, com vantagens económicas, pela produção do composto, aplicável na agricultura, ótimo para a contenção de encostas e para o combate da erosão. Quando incluído numa solução integrada tem a vantagem de reduzir ou mesmo eliminar a produção de lixiviados e de biogás nos aterros sanitários, o que torna a exploração mais económica.

Gonçalves (2005) acrescentou ainda que a compostagem assenta, fundamentalmente, no empilhamento dos resíduos orgânicos para, deste modo, permitir a conservação do calor no interior da massa dos resíduos, com o duplo objetivo de:

- Facultar a ação dos microrganismos mesófilos, cujos níveis ótimos de desenvolvimento ocorrem a temperaturas entre os 15 °C e os 45 °C, e dos termófilos, que atuam a temperaturas entre os 45 °C e os 60 °C, uma vez que se observou serem os mais eficientes na decomposição da matéria orgânica;
- Criar condições para a inativação dos microrganismos patogênicos e parasitas, que são sensíveis às elevações de temperatura e perdem em competição com a flora indígena.

Como Cunha-Queda (2006) refere, através do processo de compostagem, a “reciclagem” da matéria orgânica tem a dupla vantagem de diminuir o volume total de resíduos depositados em aterros e de permitir a obtenção de produtos com utilidade e qualidade, a qual é essencial quando o seu destino é a agricultura.

Ferreira *et al.* (1998) referem algumas das vantagens na obtenção e aplicação do composto, em agricultura biológica, muito em voga nos dias de hoje, pelo processo em questão:

- Eliminação das sementes de infestantes e de organismos patogênicos através da ação da temperatura;
- Transformação mais rápida dos materiais em nutrientes para as culturas, em vez da simples decomposição no solo;
- Possibilidade de juntar vários materiais com diferente potencial fertilizante, obtendo, no conjunto, um corretivo mais equilibrado para as culturas;
- Ativação da vida microbiana do solo;
- Supressão de cheiros desagradáveis;
- Maior resistência às pragas e doenças.

Tal como Epstein (2011) refere, o processo de compostagem pode ajudar a reduzir a quantidade de aterros sanitários e a atingir objetivos de reciclagem. A aplicação do composto ao solo leva à conservação da sua humidade, à redução da sua erosão, melhorando a infiltração e reduzindo o escoamento. Desta forma, fornece nutrientes para a produção agrícola e melhora as condições do solo para um melhor crescimento. Para além disto, o processo adiciona carbono ao solo.

Todas estas vantagens são possíveis quando os processos escolhidos são os adequados, em tecnologia, projeto e operação. Como limitações ou desvantagens são citadas (Cordeiro, 2010):

- Necessidade de maior área de terreno disponível do que no caso de outros processos de tratamento;

- Necessidade de realizar uma prévia triagem do material para que não se encontrem presentes produtos de decomposição lenta e que contenham metais pesados;
- Monitorização cuidada ao longo do processo para que não ocorram a formação de maus cheiros nem perda excessiva de humidade do material;
- Exigência de mais trabalho e consequentemente de mais mão-de-obra, o que pode traduzir-se em último caso até numa vantagem parcial já que a mesma pode ser pouco especializada, traduzindo-se num impacto social positivo.

## 2.4. Os Processos de Compostagem

### 2.4.1. Resíduos Orgânicos Biodegradáveis

Muito relevante para o processo de compostagem, é a composição bioquímica dos vários materiais utilizados na mistura inicial, uma vez que determina a sua suscetibilidade à decomposição microbiana. Materiais contendo hidratos de carbono, lípidos e proteínas, constituem uma fonte ideal de carbono e energia para os microrganismos, enquanto materiais que possuam uma fração elevada de celulose e lenhina e pouca disponibilidade em compostos azotados serão degradados muito lentamente (Batista e Batista, 2007).

Assim sendo, os resíduos que reúnem as condições mais favoráveis para a valorização por compostagem são os resíduos facilmente biodegradáveis, ou seja, a fração orgânica dos RSU e os resíduos verdes (Piedade *et al.*, 2010).

Cunha-Queda (2006) define ROB's como sendo os resíduos cuja composição é maioritariamente orgânica e que podem ser degradados por processos bioenergéticos aeróbios ou anaeróbios. Resíduos alimentares, resíduos de jardins, papel e cartão de embalagem, são exemplos de resíduos biodegradáveis. Para além destes resíduos de origem urbana, outros podem ser englobados nesta definição, como é o caso dos resíduos e subprodutos de atividades agrícolas, florestais, agroindustriais, pecuárias, pesca, aquacultura e relacionados.

### 2.4.2. Dinâmica do Processo

A compostagem envolve a decomposição biológica aeróbia dos materiais orgânicos para produzir um produto final estável. Este processo ocorre quando existe água, oxigênio, carbono orgânico e nutrientes capazes de estimular o crescimento microbiano. Ao longo do processo, os microrganismos decompõem a matéria orgânica, produzindo dióxido de carbono, vapor de água, calor e húmus (figura 4).

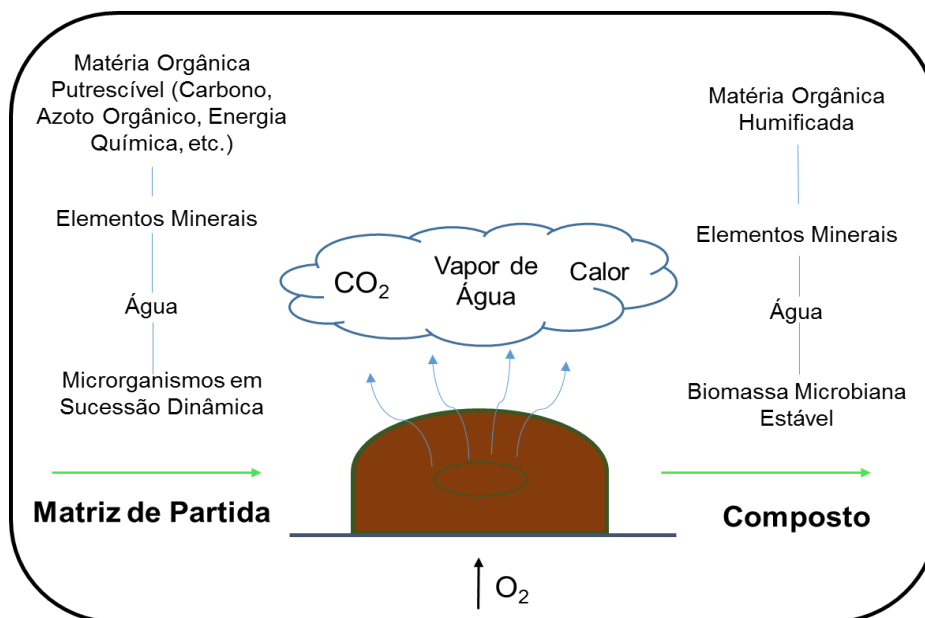


Figura 4 - Esquema do processo de compostagem (Vallini, 1995b)

Segundo Cunha-Queda (1999), os principais fatores que influenciam o processo de compostagem são os que afetam, direta ou indiretamente, o metabolismo dos microrganismos que são responsáveis pela decomposição dos resíduos e a sua transformação num produto estável e rico em substâncias húmicas - o composto. O controle e a otimização dos parâmetros operacionais têm, assim, como objetivo principal proporcionar as condições ótimas para o desenvolvimento dos microrganismos.

Assim sendo, segundo a autora, um sistema de compostagem é constituído por três etapas:

#### 1. Condicionamento dos Materiais

É um pré-processamento, onde se separa a fração orgânica de materiais contaminantes. Nesta etapa também pode ser realizada a fragmentação dos materiais com vista à obtenção de uma granulometria mais adequada, quer ao ataque microbiano quer à manutenção das condições ideais para o arejamento e ainda, ao material-base a compostar (ingrediente primário), serem adicionados agentes condicionantes e/ou agentes de suporte (bulking agents).

Os agentes condicionantes têm a função de fornecer o carbono ou o azoto, ou ainda serem corretores do teor de humidade. Normalmente, a sua função não é única, e um só material pode tanto corrigir o teor de humidade, a relação C/N e ainda a textura, de forma a garantir uma boa estrutura da mistura.

Em materiais ricos em carbono e, portanto, com uma elevada relação C/N, a adição de materiais ricos em azoto promove uma diminuição quer da relação C/N, quer do tempo necessário para a compostagem (Merkel, 1981).

Entre os materiais ricos em carbono podemos considerar os materiais lenhosos como a casca de árvores, as aparas de madeira, as podas dos jardins, folhas e agulhas das árvores, palhas e feno, e papel. Entre os materiais azotados incluem-se as folhas verdes, estrumes animais, urinas, solo, restos de vegetais hortícolas e erva (Brito, 2005).

Os agentes de suporte têm como função principal assegurar a boa estrutura da mistura a compostar, sendo também de destacar a sua capacidade de absorção de água. Destes podem ser exemplo as aparas de madeira ou estilhas, que apresentam uma elevada resistência mecânica.

Na figura 5 é esquematizado o condicionamento de uma biomassa a compostar. Neste exemplo a biomassa designada ingrediente primário, apresenta um elevado teor de humidade e de azoto. O agente condicionante terá por função corrigir, quer o teor de humidade, quer o teor de carbono, de forma a obter-se uma mistura com uma relação C/N adequada ao processo de compostagem. O agente de suporte terá por função garantir uma estrutura apropriada, de forma a que o arejamento ocorra nas condições ótimas, evitando a compactação da mistura.

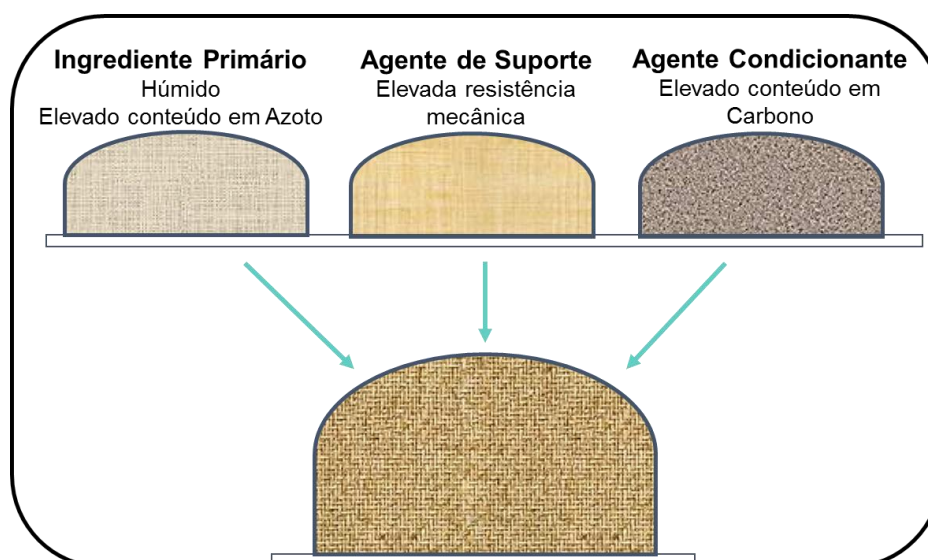


Figura 5 - Condicionamento de uma biomassa com um agente de suporte e um agente condicionante (Vallini, 1995b)

## 2. Processo de Compostagem



No processo de compostagem, são consideradas, segundo vários autores (Merkel, 1981; Vallini, 1995) duas fases principais:

- Fase ativa: a qual é caracterizada tanto pela rápida e intensa biotransformação aeróbia como por temperaturas elevadas, já que as reações de degradação são muito intensas e ocorre a libertação de calor, CO<sub>2</sub> e vapor de água;
- Fase de acabamento (*curing*): a qual se segue à fase ativa e é caracterizada por ser de lenta e progressiva diminuição da temperatura. A biomassa em compostagem perde a fitotoxicidade residual, a população microbiana atinge um equilíbrio dinâmico e ocorre a síntese de substâncias húmicas.

Cunha-Queda (2006) acrescenta que na fase ativa os componentes facilmente degradáveis são parcialmente mineralizados devido à intensa atividade microbiana. A fase de acabamento ocorre ainda em condições aeróbias, mas não fortemente oxidantes para evitar a excessiva mineralização da matéria orgânica.

Cunha-Queda (1999) salienta que quando alguns autores designam esta última fase por estabilização/maturação, pode originar alguma confusão, já que, após o arrefecimento da biomassa, e sendo esta sujeita de novo às condições propícias a ocorrer um novo pico termófilo, se este não ocorrer, a biomassa pode ser considerada estabilizada, sem que, no entanto, tenham ocorrido as reações de humificação. A grande dificuldade, na diferenciação entre composto estabilizado e composto maturado, está em se conseguir avaliar, durante o processo, onde acaba a fase ativa e tem início a fase de acabamento. Isto porque, na realidade, ocorre uma sobreposição das mesmas, pelo que muitos autores optam simplesmente pela designação de composto maturado implicando, então, a designação de composto estabilizado (figura 6).

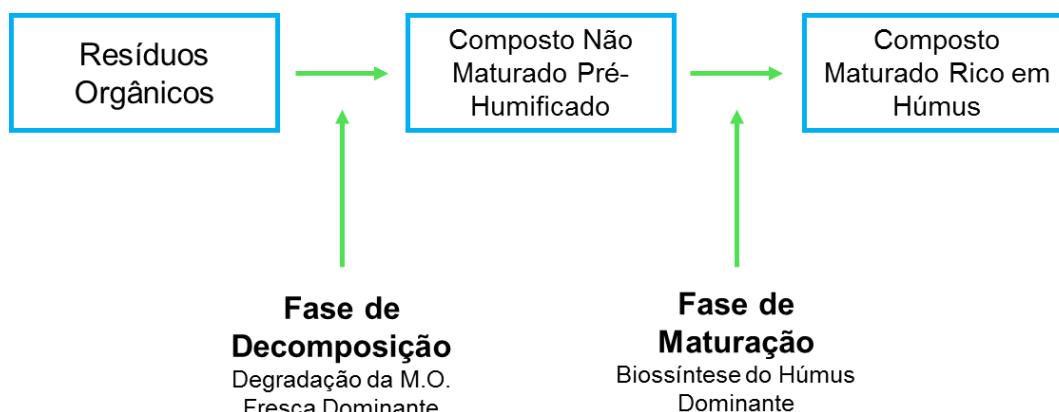


Figura 6 - Esquema simplificado da evolução de um processo de compostagem (Mustin, 1987)

### 3. Afinamento do Composto

É um pós-processamento, no qual se realiza um tratamento mecânico, que tem por finalidade melhorar as características granulométricas e remover contaminantes inertes que não foram eliminados na etapa de condicionamento, no caso dos compostos provenientes de resíduos sólidos urbanos.

#### 2.4.3. Duração do Processo de Compostagem

O tempo necessário para transformar em composto uma biomassa sujeita a uma bioestabilização aeróbia depende de muitos fatores, como sejam as características da matriz orgânica de partida, a temperatura, a humidade, o tipo de arejamento e a dimensão da pilha. (Cunha-Queda, 1999).

Segundo Vallini (1995b), se tivermos um adequado teor de humidade (60-65 %), uma relação C/N correta ( $\approx 25$ ) e um eficaz arejamento da biomassa, podemos realizar o processo de compostagem em algumas semanas. As condições que podem tornar um processo de compostagem mais longo estão relacionadas com fatores como o baixo teor de humidade do substrato, relação C/N excessivamente elevada ( $> 40$  %), baixas temperaturas, insuficiente arejamento, dimensão das partículas demasiado grande e presença significativa de materiais resistentes ao ataque microbiano.

### 2.5. Evolução dos parâmetros

A cinética da compostagem avalia-se pela taxa de decomposição dos resíduos orgânicos e a sua eficiência é determinada pelas: características do substrato, que sendo o suporte físico de todo o processo, retêm a água, garante as trocas gasosas, fornece energia e nutrientes essenciais aos microrganismos envolvidos no processo e assegura a manutenção do calor necessário; pela quantidade e diversidade de microrganismos necessários ao processo e pelos fatores ambientais existentes no início e durante o processo, influenciando as condições necessárias para a sobrevivência desses microrganismos e que necessitam de controlo durante o mesmo (oxigénio, temperatura e humidade) (Gonçalves, 2005).

#### 2.5.1. Temperatura

A produção de calor depende da velocidade a que a decomposição se processa (ou da velocidade a que os microrganismos crescem e atuam), e esta, depende do teor de humidade, arejamento e relação C/N da mistura dos materiais, da forma e do tamanho da pilha de compostagem (que afeta o arejamento e a dissipação do calor da pilha) e da temperatura exterior à pilha (Brito, 2005).

De acordo com Cunha-Queda (1999), a evolução da temperatura no processo de compostagem é caracterizada pela existência de três fases:

- Fase mesófila inicial (fase de arranque)
- Fase termófila
- Fase mesófila final (arrefecimento gradual)

Segundo a autora, a fase mesófila inicial e a fase termófila correspondem à fase ativa do processo e a fase mesófila final à fase de acabamento.

Na **fase mesófila inicial**, a temperatura da biomassa começa a aumentar devido à acumulação de energia na forma de calor, correspondendo a uma temperatura entre a temperatura ambiente e 40 °C, predominando os microrganismos mesófilos. Na **fase termófila** dá-se um aumento da temperatura da biomassa para valores entre 40 °C e 60/70 °C devido à atividade dos microrganismos mesófilos e que, por autolimitação, dão lugar aos microrganismos termófilos. Por fim, a **fase mesófila final** dá-se novamente por ação da própria atividade, sendo que os microrganismos termófilos acabam por ser inibidos, provocando um decréscimo da temperatura para valores abaixo dos 40 °C, voltando a predominar os microrganismos mesófilos.

Na figura 7 são apresentadas as curvas de evolução da temperatura e do pH durante o processo de compostagem, assim como a designação das diferentes fases que ocorrem no processo. Também se encontram referidos na figura os principais microrganismos intervenientes em cada uma das fases e quais as transformações que ocorrem ao nível dos substratos.

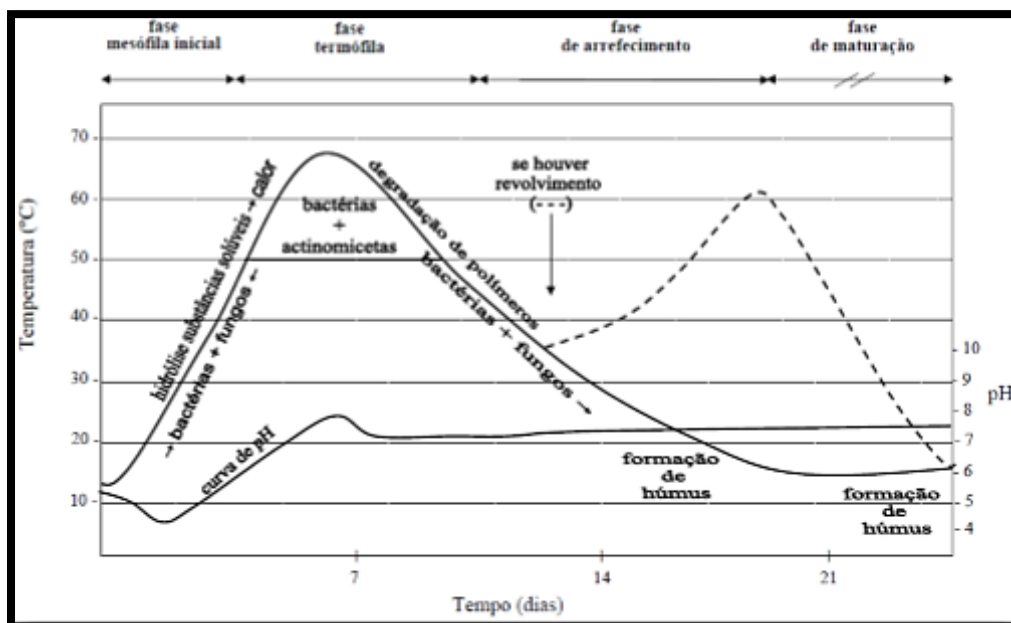


Figura 7 - Evolução da temperatura e do pH durante a compostagem (López-Real, 1995)

Martinho *et al.* (2000) refere que na fase mesófila inicial dá-se a decomposição dos compostos mais facilmente degradáveis, por bactérias e fungos mesófilos, e a energia resultante, libertada sob a forma de calor, fica parcialmente retida na massa em compostagem

devido às características térmicas do material. Para este autor, a gama de temperaturas deverá situar-se entre os 30 °C e os 38 °C.

Relativamente à fase termófila, assiste-se a um aumento gradual da temperatura até aos 50/60 °C, e consequente colonização do material em transformação, por uma sucessão de populações em função do substrato disponível, com predominância de actinomicetas e bactérias termófilas. Nesta fase, a fração orgânica é quase totalmente degradada (Martinho *et al.*, 2000).

Na opinião de Epstein (2011), as temperaturas atingidas nesta fase são muito importantes pois permitem a eliminação/inativação dos agentes patogénicos presentes nas matérias-primas e a destruição de sementes de infestantes. Vallini (1995b) diz que esta destruição só é conseguida com temperaturas superiores a 60 °C. Grundy *et al.* (1998) referem que a humidade pode contribuir para a diminuição das temperaturas necessárias à destruição das sementes de infestantes.

A última fase do processo, a fase mesófila final, Martinho *et al.* (2000) explicam que ocorre por esgotamento das fontes de carbono mais acessíveis, verificando-se uma diminuição da atividade microbiológica e consequente diminuição da temperatura. Nesta fase, compostos como lenhina, hemicelulose, celulose, amido e outros polímeros são decompostos lentamente pela ação dos microrganismos que se encontram na pilha de compostagem, à temperatura ambiente. Aqueles compostos orgânicos são transformados em colóides húmicos, estreitamente associados a elementos minerais (Carvalho e Silva *et al.*, 1999).

Epstein (2011) refere que a diminuição da temperatura até próximo da temperatura ambiente é um indicador de que o processo está quase concluído e que o material está, provavelmente, estável e maduro.

A duração e a evolução de cada uma destas fases dependem das características físicas, físico-químicas e químicas da matriz inicial, do método de compostagem utilizado e do controlo dos parâmetros operacionais ao longo do processo de compostagem. Com efeito, a diferente disponibilidade do carbono e do azoto presentes na biomassa em compostagem conduz a curvas de evolução da temperatura diversas (Mustin, 1987). O mesmo autor indica que no caso da compostagem de materiais constituídos por moléculas orgânicas facilmente degradáveis, tais como açúcares, ácidos orgânicos, proteínas, lípidos, etc., estas são completa e rapidamente degradadas, formando uma breve fase mesófila inicial e atingindo temperaturas muito elevadas na fase termófila. No caso de materiais maioritariamente constituídos por moléculas mais complexas (como por exemplo lenhina, celulose, etc.), estas só são parcialmente hidrolisadas, podendo ocorrer uma fase mesófila inicial mais prolongada e uma fase termófila também mais longa, atingindo-se uma temperatura máxima mais baixa.

Constata-se, porém, que para além da variação da temperatura ao longo do processo, esta também varia no interior da pilha de compostagem, devido à atividade microbiana através de reações exotérmicas relacionadas com o metabolismo respiratório (Martinho *et al.*, 2000). Russo (2004) acrescenta que numa pilha, as temperaturas desenvolvem-se do interior para o exterior de forma decrescente, quando aeróbias, com um perfil típico (figura 8).

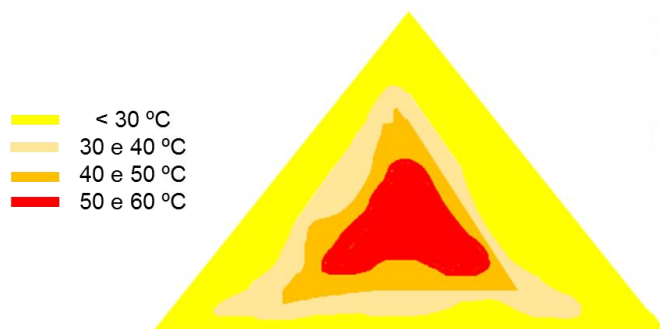


Figura 8 - Perfil típico de temperatura numa pilha de compostagem (Russo, 2003)

### 2.5.2. pH

A gama típica de valores que o pH atinge ao longo de todo o processo varia entre 4,5 e 5,5 na fase mesófila e 7,5 a 8,5 no final da maturação. Valores superiores a 8,5 são indicativos de perdas de azoto sob a forma de amónia, enquanto valores inferiores a 4,5 podem indicar que a taxa de arejamento não é adequada, tendo-se desenvolvido condições anaeróbias no interior da pilha que atrasam o processo (Piedade *et al.*, 2010).

As bactérias preferem ambientes neutros, enquanto os fungos se desenvolvem melhor em ambientes mais ácidos. À medida que os fungos e bactérias transformam a matéria orgânica, são libertados ácidos que se acumulam e acidificam o meio. Posteriormente, estes ácidos são decompostos até serem completamente oxidados (Brito, 2005).

Ao longo do processo de compostagem, o pH varia devido às transformações que ocorrem nos substratos. Na figura 9 apresenta-se uma curva típica de evolução do pH durante a compostagem.

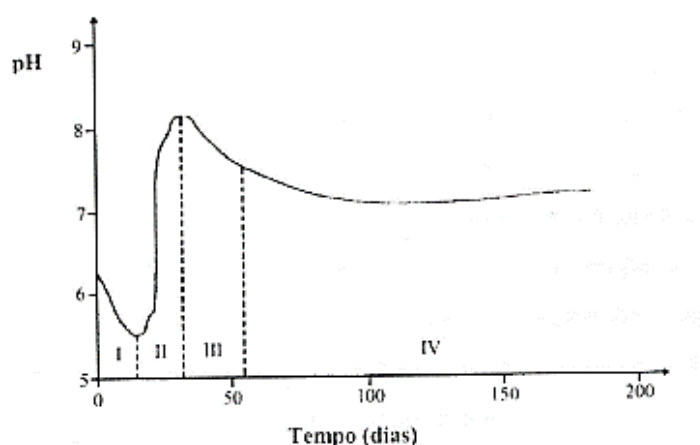


Figura 9 - Curva das variações de pH durante a compostagem (Mustin, 1987)

A figura 9 apresenta 4 fases diferentes da evolução do pH durante a compostagem, sendo elas:

- Fase I: o valor do pH diminui, sendo uma fase de acidificação, ocorrendo a produção intensa de CO<sub>2</sub> e de ácidos orgânicos. Nesta fase predominam os microrganismos mesófilos;
- Fase II: o valor de pH aumenta, devido à produção de azoto na forma amoniacal proveniente da hidrólise do azoto orgânico, por intermédio de microrganismos heterotróficos aminizantes e amonificantes, com a consequente produção de amoníaco, sendo uma fase de alcalinização na qual predominam os microrganismos termófilos;
- Fase III: é o início da estabilização do pH devido à diminuição do amoníaco produzido na fase anterior, quer devido à sua volatilização quando as condições assim a favorecem (temperatura e pH elevados), quer por ação das bactérias nitrificantes que o oxidam da forma amoniacal à forma de nitrito e, posteriormente, à forma de nitrato. Nesta fase, o azoto também é utilizado pelos microrganismos para a biossíntese das substâncias húmicas;
- Fase IV: o valor de pH tende para a neutralidade. Esta estabilização do pH deve-se às reações de maturação e ao poder tampão do húmus formado

Os valores de pH na maior parte dos compostos finais variam entre 6,0 e 8,0. Contudo, o valor final de pH depende muito das matérias-primas e do processo de compostagem usado. Uma acidez ou uma alcalinidade excessivas podem danificar as raízes das plantas, inibir o desenvolvimento das mesmas, assim como o seu crescimento (Stoffella e Kahn, 2004).

### 2.5.3. Teor de Humidade

A água é essencial para o processo de compostagem, uma vez que os nutrientes devem ser dissolvidos de modo a que os microrganismos os possam assimilar. Para além disso, a perda de água sob a forma de vapor, que se verifica pela ação conjugada do aumento da temperatura, da ventilação ou do revolvimento, contribuem igualmente para a diminuição da humidade do composto.

Por este mesmo motivo, a monitorização e controlo da humidade no início e durante o processo é fundamental, dado que este parâmetro condiciona fortemente a atividade dos microrganismos envolvidos (Piedade *et al.*, 2010).

O valor ótimo da percentagem de humidade inicial para a compostagem varia de acordo com a natureza dos materiais a compostar, devendo situar-se entre 45 a 70 % (Batista

e Batista, 2007), pois, segundo o Manual de Compostagem de Brito (2005), para valores abaixo dos 35-40 % a decomposição da matéria orgânica é fortemente reduzida.

Hamoda *et al.* (1998) afirma que o teor de humidade ótimo para o processo de compostagem é de 60 %, consoante o que foi obtido nas suas experimentações. Valores de humidade superiores a 60 % irão diminuir a difusão de oxigénio através da massa de composto, os espaços vazios serão preenchidos com água e os espaços livres de ar serão eliminados, afetando negativamente a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos. Por outro lado, níveis baixos de humidade irão diminuir a eficiência do processo de biodegradação uma vez que não haverá água suficiente para solubilizar o material orgânico que deve ser assimilado pelos microrganismos como sua fonte de energia.

No entanto, Cunha-Queda (2006) e Vallini (1995) afirmam que o teor de humidade ideal para o arranque do processo de compostagem será entre 45 e 65 %. Para teores de humidade inferiores a 45 % a atividade microbiana é baixa, e para valores acima de 65 % a difusão de oxigénio é dificultada.

Contudo, os valores referenciados como ótimos dependem da granulometria da massa em compostagem, dado que quanto maior for a dimensão das partículas, maior será o teor de humidade aceitável (Piedade *et al.*, 2010). Para Vallini (1995), além do tamanho das partículas, a porosidade e a matéria-prima utilizada também são fatores determinantes para a determinação do intervalo de teores de humidade.

#### 2.5.4. Matéria Orgânica e Disponibilidade de Nutrientes

Na perspetiva de contrariar a tendência para o esgotamento dos solos em matéria orgânica, o caminho a seguir, para além das outras práticas culturais que possam atenuar este problema, deverá promover a valorização dos resíduos orgânicos cujas características permitam a sua utilização como corretivo. No estado atual do conhecimento, não se colocam dúvidas quanto aos benefícios da presença da matéria orgânica nas características do solo e no desenvolvimento das plantas (Gonçalves, 1999).

A quantidade de nutrientes pode ser um fator limitante ao crescimento e desenvolvimento dos microrganismos intervenientes no processo de compostagem. O equilíbrio dos macronutrientes (carbono, azoto, fósforo, potássio, cálcio, magnésio) é muito importante, sendo que os micronutrientes estão normalmente em quantidade suficiente ou por vezes em excesso (Cunha-Queda, 1999).

Devido à diversidade dos substratos existentes, a matéria orgânica presente nos resíduos a compostar pode apresentar uma grande variabilidade e complexidade. Porém, um

dos objetivos da compostagem é a sua estabilização, para que o produto final se apresente estável e semelhante ao húmus (Morais, 2003).

Ao longo do processo de compostagem, o estudo da evolução da matéria orgânica permite considerar duas fases interdependentes: a de decomposição e a de humificação. Assim, torna-se essencial considerar a transformação dos componentes contendo carbono e azoto e a formação das substâncias húmicas.

Durante a fase ativa do processo ocorre a decomposição dos constituintes mais facilmente degradáveis em condições oxidantes, como sejam açúcares, ácidos gordos, gorduras, aminoácidos e proteínas. Outras moléculas como hemiceluloses, celulosas e quitina sofrem uma degradação mais lenta, sendo a lenhina a mais resistente. É nestes compostos que os microrganismos vão encontrar uma fonte de carbono, macronutrientes como o azoto, o fósforo e o potássio e alguns micronutrientes para além do oxigénio e da água necessários para o seu crescimento e a sua reprodução.

A degradação da matéria orgânica produz uma fonte de carbono servindo, maioritariamente, de fonte de energia para os microrganismos, que promovem a sua oxidação, libertando CO<sub>2</sub> e vapor de água. A energia que não é utilizada é libertada sob a forma de calor, sendo a produção de CO<sub>2</sub> mais intensa na fase ativa da compostagem (Cunha-Queda, 1999). Assim, o teor de carbono orgânico total ao longo da compostagem tende a diminuir e, segundo Ciavatta *et al.* (1993), podem ocorrer perdas de carbono na forma de CO<sub>2</sub> da ordem dos 30 %.

No que diz respeito ao azoto, naturalmente presente nas biomassas, é, na sua maior parte, orgânico e predominantemente de natureza proteica. Durante o processo de compostagem, o seu teor decresce (em valor absoluto) devido à sua conversão em azoto amoniacal e consequente perda por volatilização, a qual ocorre principalmente na fase ativa do processo. Esse fenómeno é favorecido por valores de pH e de temperatura elevados. Por outro lado, o teor de azoto, quando comparado com o teor de carbono, tende a aumentar devido à mineralização parcial da matéria orgânica e à consequente perda de CO<sub>2</sub> e de água (De Bertoldi *et al.*, 1982; Golueke, 1982; de Bertoldi *et al.*, 1983) o que explica, assim, a diminuição da relação C/N ao longo do processo de compostagem.

Na fase de acabamento ou humificação, é completado o processo de transformação da matéria orgânica, o qual ocorre em condições aeróbias ou microaerofílicas, mas não fortemente oxidantes, de modo a evitar a excessiva mineralização da matéria orgânica e permitir a formação de substâncias húmicas, bem como a eliminação de substâncias fitotóxicas, eventualmente formadas na primeira fase. O processo de humificação resulta



assim da combinação de processos biológicos, microbiológicos e químicos (Ciavatta *et al.*, 1993).

#### 2.5.5. Relação C/N

O carbono é importante uma vez que, para além de ser a fonte de energia para a atividade dos microrganismos, representa cerca de metade da massa das células microbianas. Por outro lado, o azoto é essencial para a composição de proteínas, as quais representam aproximadamente metade da biomassa microbiana (Brito, 2005). A carência de azoto é limitante no processo, por ser essencial para o crescimento e reprodução celular (Russo, 2003). A relação C/N depende assim dos microrganismos e do meio de crescimento, onde 2/3 do carbono se perde como CO<sub>2</sub> e 1/3 se combina com o azoto nas reações celulares (Russo, 2004).

Vallini (1995b) refere que em geral os microrganismos, para as suas reações energéticas e de crescimento, utilizam o carbono numa quantidade vinte vezes superior à do azoto. Segundo o mesmo autor, para as biomassas a compostar, o intervalo ótimo para a relação C/N deve estar compreendido entre 25:1 e 30:1 e o intervalo de compatibilidade (suscetível de ser utilizado) entre 20:1 e 40:1. Com valores inferiores a 20:1, o carbono disponível é completamente utilizado sem que haja a estabilização completa do azoto. O excesso de azoto pode ser perdido para a atmosfera na forma de amoníaco, especialmente para valores de pH e temperatura elevados, o que causa odores indesejáveis. Se os substratos tiverem uma relação superior a 40:1, requerem um tempo de compostagem longo, já que os microrganismos terão que oxidar o excesso de carbono até que a relação C/N seja mais propícia ao seu metabolismo (De Bertoldi *et al.*, 1985; Vallini, 1995b).

Na opinião de Brito (2005), esta relação pode variar em função das características específicas dos materiais utilizados, como sendo a disponibilidade do carbono desses materiais para o ataque microbiano. Esta sua opinião aparece relacionada com o facto de apesar de todo o azoto orgânico estar disponível para ser utilizado pelos microrganismos, o mesmo não se verifica relativamente ao carbono de determinados materiais, por se encontrar em formas resistentes à degradação biológica. A relação C/N da mistura utilizada no processo tem de ser ajustada em função da disponibilidade de carbono e de azoto nos materiais.

Durante a compostagem, aproximadamente metade do volume da pilha será perdido com a decomposição dos materiais. Pelo menos metade do carbono da pilha é perdida principalmente na forma de CO<sub>2</sub> e o azoto perdido por volatilização do amoníaco e por lixiviação e desnitrificação dos nitratos. O carbono é perdido mais rapidamente do que o azoto, e, por isso, a relação C/N diminui durante a compostagem, podendo atingir valores de 15 ou 10 (Brito, 2005).

Por vezes, o valor da relação C/N pode ser superior a 20 em compostos relativamente maturados, por exemplo quando parte do carbono orgânico se encontra em moléculas resistentes à degradação (ex: lenhina) e por isso, dificilmente disponível para os microrganismos (Cunha-Queda *et al.*, 2002). Assim, de acordo com estes autores, esta razão não pode por si só constituir um indicador absoluto do estado de maturação dos compostos, e terá de ser interpretada sempre de acordo com as características iniciais dos materiais orgânicos. Outra relação indicativa do grau de maturação de um composto, foi proposta por Jiménez e García (1989), a relação  $[(C/N \text{ final}) / (C/N \text{ inicial})]$ . Segundo estes, se a relação C/N diminui ao longo do processo de compostagem até se considerar o composto estável, então a relação  $[(C/N \text{ final}) / (C/N \text{ inicial})]$  também diminui, considerando razoável para o composto maturado uma relação de 0,75 ou, preferencialmente, 0,6.

#### 2.5.6. Granulometria do Material

A porosidade, a estrutura e a textura da matriz inicial estão relacionadas com as características físicas dos materiais que os constituem como sejam formato, dimensão e resistência à compactação das partículas da biomassa, e podem influenciar o processo de compostagem no que respeita ao arejamento (Cunha-Queda, 1999).

A autora acrescenta que, por vezes, o material condicionante é, por si só, suficiente para assegurar quer a correção, por exemplo, do teor de carbono e da humidade, quer a porosidade da mistura a compostar.

Piedade *et al.* (2010) refere que a granulometria do material a compostar influencia as condições em que o processo decorre, nomeadamente a circulação do oxigénio e da água, a superfície de contacto entre os resíduos e os microrganismos e a homogeneidade do material.

Se a granulometria das partículas a compostar for demasiado baixa, há tendência para a compactação dos resíduos e a possível formação de condições anaeróbias durante o processo. No caso de o tamanho médio das partículas ser demasiado elevado, é necessário proceder à sua redução de modo a aumentar a superfície de contacto entre os resíduos e os microrganismos, aumentando por sua vez a velocidade da reação (Piedade *et al.*, 2010).

#### 2.5.7. Arejamento e Disponibilidade de Oxigénio

Gonçalves (1999) refere que o oxigénio passível de utilização pelos microrganismos responsáveis pela compostagem – para oxidar os compostos orgânicos e deste modo obter a energia necessária ao seu desenvolvimento – é o que integra a mistura gasosa que preenche os espaços existentes entre as partículas dos substratos (macroporos). Os microrganismos assimilam o oxigénio dissolvido na água, pela sua difusão através dos espaços intersticiais e do filme da solução aquosa que envolve as partículas orgânicas. O

dióxido de carbono e o vapor de água resultantes das trocas gasosas que se realizam nas células microbianas (micélios) atravessam, também, a película de água que envolve as partículas do substrato e encaminham-se para os espaços intersticiais. Os macroporos estão, assim, permanentemente preenchidos pelos gases que constituem o ar.

Para que se mantenham as condições de aerobiose do meio, Cunha-Queda (2006) indica que as concentrações de oxigénio na mistura gasosa deverão ser superiores a 10 %.

De acordo com Mustin (1987), o consumo de oxigénio verificado numa biomassa em compostagem é, portanto, um parâmetro diretamente relacionado com a atividade dos microrganismos aeróbios.

Os mais elevados consumos de oxigénio ocorrem para valores de temperatura entre 28 e 55 °C, em que existe maior atividade microbiológica (Finsten *et al.*, 1980; Haug, 1979). Após a fase termófila, as necessidades de oxigénio vão-se gradualmente reduzindo, tal como se pode observar na curva teórica das necessidades de oxigénio ao longo da compostagem, apresentada na figura 10.

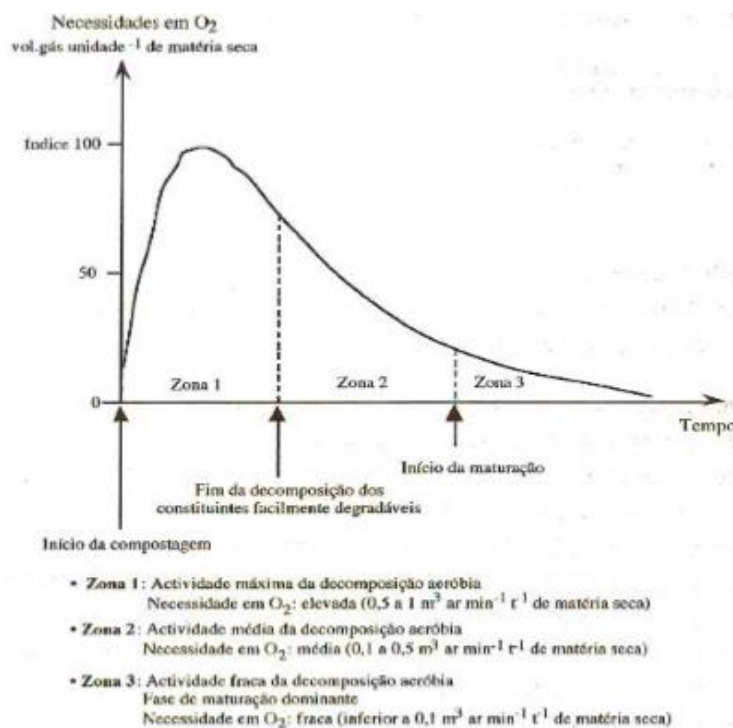


Figura 10 - Curva teórica das necessidades em oxigénio durante o processo de compostagem (Mustin, 1987)

Nos primeiros dias do processo, os substratos mais facilmente degradáveis presentes na biomassa são rapidamente metabolizados e, assim, as necessidades de oxigénio, bem como a produção de calor, são maiores na fase ativa da compostagem, diminuindo na fase seguinte (Vallini, 1995).

Um correto arejamento do material em compostagem torna-se essencial para garantir: o fornecimento de oxigénio necessário aos microrganismos aeróbios, a remoção do excesso de calor formado durante o processo (principalmente por evaporação de água) e a remoção do calor gerado nas reações de degradação, de modo a controlar a temperatura do interior da massa de compostagem (Piedade *et al.*, 2010), permitir a secagem do material e a remoção dos gases resultantes da decomposição ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , etc.).

Vallini (1995b) refere que um dos inconvenientes do arejamento realizado por revolvimento é que o oxigénio introduzido por esta operação é rapidamente consumido pelos microrganismos, o que se traduz numa variação cíclica da concentração de oxigénio no interior da pilha. Assim, devido às oscilações do teor de oxigénio presente, a oxidação biológica não é mantida de forma constante no máximo de eficiência, constituindo um fator limitante. No entanto, é de referir que a operação de revolvimento também promove a mistura e homogeneização dos materiais de partida durante o processo, facilita a desagregação e a redução do tamanho das partículas, aumentando assim a superfície disponível ao ataque microbiano e assegura a manutenção da porosidade da matriz em transformação, aumentando as trocas passivas de ar.

No entanto, abaixo de 10 % de oxigénio, o processo não se mantém nas condições ótimas (Brito, 2005). Se se verificar esta diminuição, os microrganismos aeróbios começam a rarear, dando lugar ao aparecimento de microrganismos anaeróbios (Russo, 2003), originando uma acumulação de compostos como ácidos orgânicos voláteis, sulfuretos, etc., caracterizados por uma elevada fitotoxicidade, um odor agressivo e por vezes difíceis de eliminar completamente (Cunha-Queda, 1999).

## 2.6. Dinâmica do Azoto

Durante a compostagem das biomassas, as formas azotadas naturalmente presentes sofrem sucessivas transformações (Cunha-Queda, 1999).

O mesmo autor refere que as moléculas que contêm azoto (proteínas, etc.) são degradadas na fase ativa do processo, por microrganismos heterotróficos amenizantes, originando aminas e aminoácidos que, em seguida serão transformados em amoníaco por microrganismos heterotróficos amonificantes. O azoto na forma amoniacal sofre volatilização por efeito do aumento da temperatura e do pH, provocando uma diminuição do azoto total (figura 11).

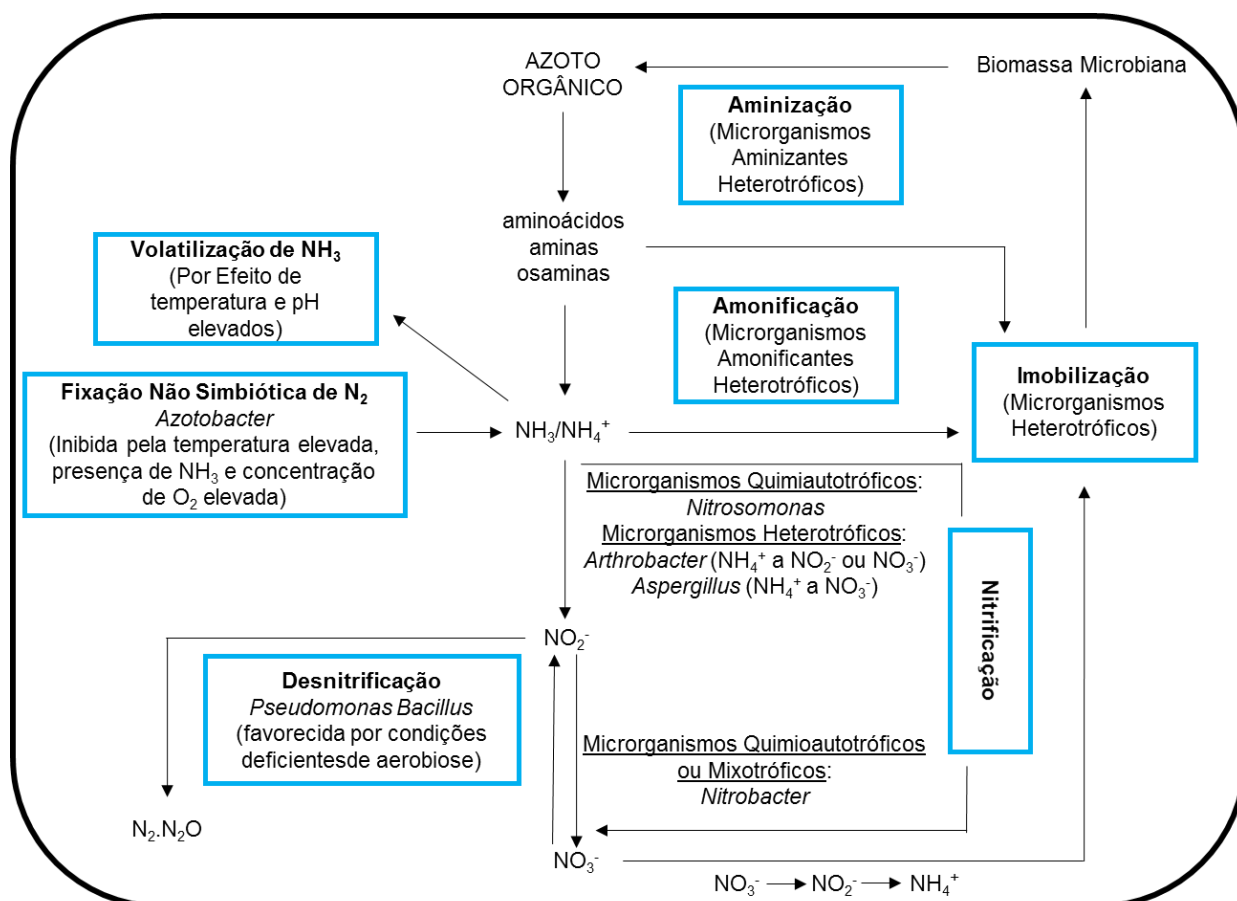


Figura 11 - Dinâmica do azoto no processo de compostagem (Cunha-Queda, 1999)

Outra transformação que ocorre ao longo do processo de compostagem é a conversão do azoto amoniacal em azoto nítrico. Com esta transformação, diminui o azoto na forma  $\text{NH}_4^+$  (amoniacal) e aumenta nas formas  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NO}_2^-$ . Apesar de ocorrerem perdas por volatilização na fase ativa do processo, a quantidade de azoto amoniacal formada é superior à que é volatilizada, o que pode ser explicado pela nitrificação (Neto *et al.*, 1987).

## 2.7. Populações Microbianas e a sua Dinâmica na Compostagem

A transformação da matéria orgânica biodegradável através da compostagem decorre em diferentes fases seguidas, caracterizadas pela intervenção de diferentes grupos de microrganismos que se sucedem em função da alteração das condições físicas, físico-

químicas, químicas e biológicas do meio, que favorecem a predominância de um ou mais grupos em detrimento de outros e que também são, por sua vez, resultantes do metabolismo microbiano (Cunha-Queda, 1999).

Existem numerosos microrganismos envolvidos no processo de compostagem, tais como bactérias, actinomicetas, fungos, protozoários e algas. As bactérias são a população mais numerosa, sendo também os principais microrganismos degradantes, uma vez que decompõem mais facilmente os compostos carbonados (Epstein, 2011).

Com efeito, a substituição da atividade dos microrganismos mesófilos pela atividade dos microrganismos termófilos é uma consequência do metabolismo da população inicial. Outra situação é a disponibilidade de nutrientes onde, em primeiro lugar, serão utilizados os substratos mais fáceis de degradar e, seguidamente, os mais difíceis. Também a influência do pH é decisiva na evolução das populações microbianas (Cunha-Queda, 1999).

De Bertoldi *et al.* (1982 e 1983) referem que, na fase mesófila inicial do processo, verifica-se o aumento da temperatura, como resultado da metabolização e mineralização de moléculas simples contendo carbono e azoto (açúcares solúveis, ácidos orgânicos, proteínas, lípidos), por ação de uma população heterotrófica, heterogénea, mesófila e aeróbia, essencialmente constituída por bactérias e por alguns fungos, já que o teor de humidade é normalmente elevado, sendo por isso mais favoráveis às bactérias. A figura 7, no subcapítulo 2.5.1, apresenta a presença destas bactérias e fungos durante a fase mesófila inicial. Por sua vez, o aumento da temperatura tem como consequência um efeito seletivo a favor de um grupo restrito de microrganismos heterotróficos, aeróbios e termófilos. Durante esta fase termófila, o número de bactérias e de fungos mesófilos decresce, aumentando o número de bactérias e de fungos termófilos. Os actinomicetas são inibidos pelas temperaturas elevadas, mas, após o arrefecimento para temperaturas mesófilas, crescem rapidamente.

Atingindo-se temperaturas acima de 55 °C, muitos dos microrganismos patogénicos, quer para o Homem quer para as plantas, são eliminados. Acima dos 65 °C a maioria dos microrganismos são destruídos, incluindo os responsáveis pela decomposição (Brito, 2005).

As moléculas orgânicas mais complexas (celulose, amido, pectinas e lenhina) são atacadas posteriormente por fungos e actinomicetas. A degradação da celulose ocorre durante todo o processo, mas é mais intensa na fase mesófila final, sendo responsáveis pela sua degradação os fungos celulolíticos e os actinomicetas. Na fase final do processo verifica-se, portanto, um decréscimo do número de bactérias celulolíticas e um aumento de fungos celulolíticos. Os fungos beneficiam do decréscimo da temperatura, do pH e da humidade que ocorre ao longo do processo e que também favorece os actinomicetas, cuja atividade é fundamentalmente na humificação da matéria orgânica e na libertação de substâncias

aromáticas (geosmina) que conferem aos compostos o aroma vulgarmente designado de “terra molhada” (De Bertoldi e Zucconi, 1980).

Outra transformação que ocorre ao longo do processo é a nitrificação que corresponde à conversão do azoto amoniacal em azoto nítrico, sendo esta quantia formada superior às perdas de azoto sob a forma amoniacal, na fase ativa, cujas condições de temperatura e pH elevados favorecem a volatilização do amoníaco formado por ação das bactérias heterotróficas amonizantes (Neto *et al.*, 1987). Durante a nitrificação, o azoto, na forma amoniacal, é oxidado por ação de microrganismos autotróficos designados por bactérias nitrificantes.

## 2.8. Atividades Enzimáticas Durante o Processo de Compostagem

Como a compostagem é um processo onde ocorre a decomposição de matéria orgânica, as enzimas têm neste processo um papel fundamental como catalisadores bioquímicos das reações. No entanto, a sua importância não está restrita ao processo, a sua ação também é importante no produto obtido a partir da compostagem, o composto, já que sendo um dos principais destinos a sua aplicação aos solos, também aí Nannipieri *et al.* (1990) referem o seu importante papel na fertilidade bioquímica dos solos.

Mustin (1987) considera dois tipos de enzimas: as extracelulares que são produzidas e excretadas pelos microrganismos em atividade, e as intracelulares, libertadas após a morte ou destruição das células, e cuja atividade é independente da célula que lhes deu origem, durante mais ou menos tempo, consoante as condições do meio em que se encontram. As enzimas intracelulares são importantes, já que indicam que existe uma atividade enzimática no composto e que esta é independente dos seres vivos nele presentes. No entanto, durante a compostagem, são as enzimas extracelulares que desempenham o papel principal na transformação dos substratos presentes nas biomassas. Com efeito, as moléculas de massa molar elevada são hidrolisadas por enzimas extracelulares e excretadas pelos microrganismos, como por exemplo, as proteases, lípases, celulasas e fosfatases.

Ayuso *et al.* (1996) referem que a decomposição dos substratos facilmente degradáveis presentes nas biomassas pode ser seguida pelo estudo da atividade de hidrólases específicas, relacionadas com os ciclos do azoto, fósforo e carbono.

No que se refere ao ciclo do azoto, são as proteases que transformam as proteínas em péptidos e, seguidamente, os péptidos em aminoácidos. Estas enzimas têm um papel essencial na disponibilização do azoto necessário para uma boa atividade microbiana durante o processo de compostagem.

Outras enzimas como as fosfatases são essenciais no ciclo do fósforo, pois catalisam as reações de hidrólise dos componentes orgânicos fosfatados (Ayuso *et al.*, 1996) e são referidas como indicadores da atividade microbiana (Speir e Ross, 1978). Godden *et al.* (1986), que estudaram a evolução das fosfatases alcalinas durante ensaios de compostagem com estrume de bovinos, referem que a sua atividade foi elevada durante a fase termófila, e que também são esperados valores elevados no final da fase de estabilização quando o processo de compostagem decorre em condições ótimas e que, pelo contrário, nos processos que decorrem em más condições, o valor de atividades das fosfatases alcalinas nunca é elevado. A partir destes resultados, os autores referem que valores elevados e constantes de atividade das fosfatases alcalinas parecem estar correlacionados com compostos maturados; valores baixos, mas crescentes de atividade destas enzimas, corresponderão a compostos quase maturados; e valores de atividade baixos, mas constantes e/ou decrescentes, corresponderão a compostos provenientes de processos de compostagem mal conduzidos.

Relativamente às enzimas relacionadas com o ciclo do carbono, as lípases, a N-acetil $\beta$ -D-glucosaminidase, a  $\beta$ -glucosidase e as celulases desempenham um papel importante na degradação da matéria orgânica (Cunha-Queda, 1999).

## 2.9. Qualidade dos Compostos

Facilmente se percebe a importância que o fator qualidade tem quando nos referimos a transformações de matéria orgânica para fins agrícolas. Esta qualidade depende dos cuidados que se verificam ao longo de todo o processo de compostagem, da tecnologia utilizada, das matérias-primas, do grau de estabilidade e de maturação do produto final, bem como do seu conteúdo em matéria orgânica e presença de substâncias potencialmente perigosas e indesejáveis ao ambiente e às normas de qualidade (Teodoro, 2006). Pode-se assim entender por qualidade do composto para fins agrícolas como sendo a sua aptidão para ser utilizado, com os benefícios inerentes, na agricultura, sem que daí advenham efeitos negativos no solo, plantas, animais, homem e no ambiente, em geral (Gonçalves, 1999).

De acordo com Cunha-Queda (1999), se os materiais a compostar não tiverem qualidade, o produto final será afetado. De facto, se uma biomassa apresentar, por exemplo, metais pesados, o teor destes não diminuirá com este tratamento. Assim, para obter bons compostos devemos partir de biomassas putrescíveis com qualidade. A compostagem é mais do que um tratamento de resíduos, é uma forma de obtenção de produtos, cuja qualidade final nunca deverá ser esquecida. Caso apenas seja vista como um tratamento, corremos o risco de obter produtos que irão causar problemas sérios aquando da sua aplicação aos solos, problemas esses que nem sempre são imediatamente detetáveis.



Numa avaliação global da qualidade dos compostos, devem ser considerados os aspetos relacionados com os impactes ambientais, agronómicos e os relacionados com a estabilidade e a maturação dos compostos. Porém, no que se refere às normas de qualidade para compostos não existe, a nível da União Europeia, uma norma específica. Em Portugal são definidos no Decreto-Lei n.º 103/2015, que estabelece regras relativas à colocação no mercado dos adubos e corretivos agrícolas, alguns dos parâmetros a considerar e valores limite para a avaliação da qualidade de compostos, visando aplicações distintas na agricultura.

Com efeito, no Decreto-Lei n.º 103/2015 são estabelecidas classes de qualidade para o composto em função de alguns parâmetros e fixados critérios para a sua utilização, bem como as restrições julgadas convenientes para evitar efeitos indesejáveis para o solo, água, plantas, animais e seres humanos, tendo em conta as classes definidas e o tipo de utilização. Assim, consta que o composto deve conter um teor mínimo de 30 % de matéria orgânica, reportado à matéria seca, o teor máximo de humidade, expresso em percentagem em massa, é de 40 % e ainda que o pH deve situar-se entre 5,5 e 9,0, entre outros requisitos adicionais.

Na avaliação da qualidade dos compostos é muito importante avaliar a sua estabilidade e maturação, e dada a inexistência de um método universal para proceder à avaliação, torna-se necessário recorrer a vários métodos para indicar uma conclusão segura sobre a qualidade dos compostos.

#### 2.9.1. Avaliação da Estabilização/Maturação dos Compostos

De acordo com Cunha-Queda (1999), a estabilidade e maturação dos compostos são na realidade conceitos diferentes, estando efetivamente relacionados com as fases do processo. No entanto, ambos os conceitos integram o conceito de qualidade dos compostos, bem como a forma como o mesmo decorreu.

Haug (1980) refere que o termo estabilização tem sido utilizado com o significado de oxidação dos materiais orgânicos e a sua conversão em formas menos suscetíveis de serem degradadas, ou seja, mais estáveis, e que, embora sejam ainda passíveis de degradação, apenas o são numa taxa muito menor quando comparados com os materiais iniciais.

Por sua vez, Buchanan *et al.* (2002), definem estabilidade como uma fase específica da decomposição ou estado da matéria orgânica durante a compostagem, estando assim relacionada com o tipo de compostos orgânicos existentes e a respetiva atividade microbiológica daí resultante.

Cunha-Queda (2002) menciona que a estabilidade de um composto pode ser designada como resultado da elevada taxa de reações microbiológicas que ocorrem durante

a fase ativa do processo, enquanto a maturação aparece, pelo contrário, como efeito da fase de *curing*.

O conhecimento da estabilidade dos compostos é importante, na medida em que fornece informações acerca do processo, bem como permite comparar a eficiência de diferentes sistemas de compostagem. Cintra (2003) acrescenta que também se trata de um parâmetro necessário na determinação do potencial impacto que terá a aplicação do composto ao solo, principalmente na disponibilidade de nutrientes e de oxigénio (devido à atividade microbiológica do composto).

He *et al.* (1992) referem que a maturação de um composto, a qual, pode ser definida como o grau de estabilidade das suas propriedades físicas, químicas e biológicas, é um fator importante que afeta o sucesso da utilização agrícola dos compostos bem como os impactes ambientais provocados pela utilização dos mesmos.

Adani (2002) acrescenta que a estabilidade e maturidade são apenas propriedades biológicas dos compostos que relacionam a atividade microbiológica com a presença ou ausência de fitotoxicidade, não descrevendo a quantidade de matéria orgânica que é decomposta e/ou humificada. Portanto, estes dois parâmetros apenas fornecem informação sobre aspetos relacionados com a higiene dos compostos (estabilidade) ou com o crescimento das plantas (maturação).

Cunha-Queda (1999) afirma que são vários os parâmetros que têm sido propostos para a avaliação da estabilidade e da maturação dos compostos, verificando-se que não existe um único parâmetro que, por si só, permita avaliar a qualidade dos compostos.

### **Parâmetros para a avaliação da estabilidade dos compostos**

O conhecimento da estabilidade dos compostos fornece indicações acerca do processo, bem como permite comparar a eficiência de vários sistemas de compostagem (Iannotti *et al.*, 1993).

#### Avaliação da Atividade Microbiana

Vários autores (Jiménez e Pérez García, 1989; Frost *et al.*, 1992; Iannotti *et al.*, 1993; Richard e Zimmerman, 1995; Adani *et al.*, 1997) referem-se aos parâmetros de estabilidade dos compostos como sendo os que estão relacionados com a avaliação da atividade biológica, sendo, neste caso, a dos microrganismos e, conseqüentemente, com o grau de transformação dos componentes das biomassas facilmente degradáveis. Os métodos para a avaliação dos

parâmetros de estabilidade são baseados, em parte, na hipótese inicial de que a maturação dos compostos está relacionada com a sua estabilidade biológica (Morel *et al.*, 1985).

### Teste de Auto-Aquecimento

Trata-se de um método relacionado com a atividade biológica e que consiste em avaliar a variação da temperatura de uma amostra de composto colocada num recipiente térmico (*Dewar flask*), em intervalos regulares e durante vários dias (na metodologia são propostas 72 horas, mas o aconselhado são 10 dias).

Morais (2003) indica que a classe de estabilidade da amostra de composto será determinada pela temperatura máxima atingida pela mesma quando colocada no recipiente adiabático. O valor máximo de temperatura alcançada em função da atividade biológica vai depender do estado de degradação da matéria orgânica do composto (Cintra, 2003).

Segundo o documento de referência LAGA-Merkblatt M10 (1995) os compostos são classificados em função da temperatura máxima alcançada neste teste (tabela 2).

*Tabela 2 - Classes de estabilidade para compostos (Laga-Merkblatt M10, 1995)*

Classe de Estabilidade	Temperatura Máxima (°C)	Designação do Produto
I	> 60	Matéria Orgânica Fresca
II	50 – 60	Composto Fresco
III	40 – 50	Composto Fresco
IV	30 – 40	Composto Maturado
V	< 30	Composto Maturado

### **Parâmetros para a avaliação da maturação dos compostos**

#### A relação C/N

É um parâmetro utilizado para avaliar o grau de maturação de um composto e definir a sua qualidade agronómica. No entanto, no caso de parte do carbono orgânico integrar moléculas mais resistentes à biodegradação e que, consequentemente, não estão facilmente disponíveis para a utilização pelos microrganismos, por vezes, este valor pode ser superior a 20 mesmo no caso de compostos relativamente maturados (Regan e Jeris, 1970; Jeris e Regan, 1973). Portanto, a relação C/N não pode constituir um indicador absoluto do estado de maturação dos compostos, por apresentar grande variabilidade em materiais bem compostados, devido sobretudo às diferentes origens e proveniências dos materiais utilizados (Hirai *et al.*, 1983).

Também é possível avaliar a maturação de um composto através da análise das substâncias húmicas, capacidade de troca catiónica e fitotoxicidade.

### **Parâmetros Empíricos**

Ao longo do processo de compostagem, os materiais sofrem várias transformações que podem ser avaliadas quer pelo tato, quer visual e olfativamente.

Com efeito, a aparência dos materiais muda radicalmente e nos produtos finais não deve ser possível identificar quer os materiais iniciais, quer as suas características de cor e de odor (Cunha-Queda, 1999). É, pois, uma prática usual a observação da cor dos compostos, já que durante o processo se verifica que os materiais escurecem gradualmente.

O odor também varia e, nos compostos maturados, é característico o aroma vulgarmente designado de “terra molhada” devido à presença de geosmina.

A avaliação da temperatura ao longo do processo é outra prática usual. Stickelberger (1975) define um composto suficientemente maturado quando a temperatura permanece constante e não varia com o revolvimento do material. Esta avaliação pode ser feita por meio de sondas de temperatura ou, mais empiricamente, através do tato.

## **Capítulo 3 – Materiais e Métodos**

O presente trabalho foi realizado no Instituto Superior de Agronomia, na Unidade Piloto de Compostagem do Horto de Química da Secção de Química e Ambiente do Departamento de Ciências e Engenharia de Biosistemas (DCEB).

O trabalho consistiu na montagem e acompanhamento de duas pilhas distintas, constituídas por resíduos provenientes da Tapada da Ajuda, ao longo de todo o processo de compostagem, inicialmente no seu estado fresco e, posteriormente nos seus diferentes graus de estabilidade e maturação.

### **3.1. Descrição da Tapada da Ajuda**

A Tapada da Ajuda é um Parque Botânico com cerca de 100 ha, no interior da cidade de Lisboa, onde se destacam a Reserva Botânica Natural D. António Xavier Pereira Coutinho, que tem representadas espécies típicas do clímax da zona, jardins, arboretos diversos, viveiros florestais, terrenos de cultura e diversas espécies domésticas e silvestres características. Dentro da Tapada encontra-se também o Observatório Astronómico de

Lisboa, o Instituto Superior de Agronomia, o Pavilhão de Exposições e os campos de jogos de Agronomia.

Como áreas de interesse na produção de resíduos, destacam-se os 23 000 m<sup>2</sup> de vinha, os 253 000 m<sup>2</sup> de área agroflorestal, os 4 500 m<sup>2</sup> de hortas urbanas e os 50 000 m<sup>2</sup> de Terra Grande, sendo esta última uma das maiores e mais emblemáticas parcelas do Instituto (figura 12).

Existem ainda uma cantina, vários restaurantes e cafés no interior da Tapada, bem como pomares, estufas, jardins e estábulos.



*Figura 12 - Pormenor do Instituto Superior de Agronomia e sua vinha*

### 3.2. Biomassas Utilizadas no Processo

Os resíduos utilizados neste ensaio são exclusivamente provenientes da Tapada da Ajuda, resultantes de cortes de relva, resíduos agropecuários, agroflorestais e alimentares, que não sofreram qualquer tipo de pré-tratamento prévio à montagem das pilhas. Na seleção destes resíduos teve-se em consideração quer a disponibilidade dos mesmos quer as suas potencialidades de valorização.

As biomassas utilizadas podem dividir-se em 3 categorias, de acordo com a função desempenhada no processo de compostagem:

- Ingredientes Primários
- Agentes Condicionantes
- Agentes de Suporte

Como ingredientes primários foram utilizados os seguintes resíduos:

#### Estrume de Equídeos



- Recolhido dos garranos existentes na Tapada;
- Rico em azoto

#### Cortes de Relva e Resíduos de Jardim



- Provêm da manutenção dos jardins da Tapada;
- Rico em azoto e carbono;
- Pode conter sementes de infestantes

#### Borras de Café



- Proveniente do bar do Instituto;
- Têm uma constituição homogênea, teores de azoto elevados, teores de potássio e fósforo muito reduzidos, pH na gama do ácido e absorvem odores

#### Cascas de Batata e Cenoura



- Recolhido no bar do Instituto;
- Ricas em açúcares simples como a glucose e o amido, no caso da cenoura e da batata, respetivamente, disponibilizam açúcares de fácil digestão aos microrganismos das pilhas

Como agentes condicionantes foram utilizados os seguintes:

#### Palha



- Proveniente de culturas da Terra Grande da Tapada da Ajuda;
- Dada a dimensão das suas partículas, constitui em simultâneo um excelente agente condicionante e de suporte

#### Folhas Secas



- Proveniente das operações de limpeza dos jardins e das matas da Tapada da Ajuda;
- Serve de agente condicionante devido ao seu elevado teor em carbono

Como agentes de suporte foram utilizados os seguintes:



- Provenientes das limpezas agroflorestais da Tapada da Ajuda;
- Servem como material de suporte devido às suas características estruturantes



- Proveniente da vinha da Tapada da Ajuda;
- Resíduo lenhocelulósico com cerca de 78 % de água, sendo pobre em açúcar e em ácidos;
- Aplicações limitadas à utilização como fertilizante

Parâmetros	Estrume	Resíduos Verdes	Borras de Café	Cascas de Batata e Cenoura
<b>Humidade (%)</b>	64,340 (7,958)	90,393 (0,366)	62,313 (0,437)	54,463 (23,623)
<b>MO (% m.s.)</b>	34,349 (17,373)	85,421 (0,767)	97.791 (0.127)	92,855 (3,865)
<b>pH</b>	7,290 (0,070)	5,497 (0,006)	6,477 (0,023)	6,200 (0,050)
<b>CE (mS cm<sup>-1</sup>)</b>	0,124(0,012)	0,123 (0,002)	0,341 (0,017)	0,110 (0,003)
<b>Carbono Orgânico Total (% m.s.)</b>	21,044 (5,031)	33,628 (3,173)	49,871 (0,666)	43,047 (32,177)
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	168,929 (5,121)	1688,306 (49,733)	381,753 (26,678)	327,230 (23,489)
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	118,906 (16,380)	1417,540 (49,733)	250,359 (5,327)	343,528 (18,554)
<b>Nt (% m.s.)</b>	1,028 (0,010)	1,711 (0,015)	2,410 (0,025)	1,768 (0,027)
<b>C/N</b>	20,498 (5,112)	19,648 (1,788)	20,692 (0,062)	24,369 (18,397)

As caracterizações físico-químicas dos ingredientes primários, dos agentes condicionantes e dos agentes de suporte utilizados são apresentadas, nas tabelas 3, 4 e 5.

*Tabela 3 - Caracterização físico-química dos materiais primários*

m.s. – valores referidos à matéria seca  
Média (desvio padrão)

Parâmetros	Palha	Folhas Secas
<b>Humidade (%)</b>	54,767 (4,104)	43,785 (2,520)



<b>MO (% m.s.)</b>	88,928 (1,124)	82,928 (0,185)
<b>pH</b>	7,660 (0,111)	6,470 (0,026)
<b>CE (mS cm<sup>-1</sup>)</b>	0,697 (0,022)	0,073 (0,002)
<b>Humidade (%)</b>	52,581 (1,748)	18,188 (0,845)
<b>Total MO (% m.s.)</b>	90,755 (1,350)	92,670 (0,194)
<b>pH</b>	7,227 (0,015)	4,250 (0,175)
<b>CE (mS cm<sup>-1</sup>)</b>	0,123 (0,004)	0,660 (0,105)
<b>Carbono Orgânico Total (% m.s.)</b>	36,523 (2,606)	40,429 (2,289)
<b>Nt (% m.s.)</b>	1,113 (0,021)	1,583 (0,026)
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	234,067 (17,284)	469,660 (19,458)
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	223,706 (12,064)	370,510 (22,597)
<b>Nt (% m.s.)</b>	1,416 (0,057)	0,654 (0,029)
<b>C/N</b>	25,855 (2,723)	62,033 (6,037)

Tabela 4 - Caracterização físico-química dos materiais condicionantes

m.s. – valores referidos à matéria seca  
Média (desvio padrão)

Tabela 5 - Caracterização físico-química dos materiais de suporte

m.s. – valores referidos à matéria seca  
Média (desvio padrão)

Da análise das características dos materiais primários, verifica-se logo à partida a reduzida quantidade de matéria orgânica do estrume, o que indica que o mesmo se encontrava num estado altamente mineralizado. Os resíduos verdes apresentam um elevado teor de humidade, visto que foram recolhidos numa altura de precipitações elevadas (fevereiro de 2016). As borras de café são, de entre os ingredientes primários, os que apresentam o valor de azoto total mais elevado. As cascas de batata e cenoura apenas foram adicionadas às pilhas posteriormente, com o objetivo de aumentar a temperatura, pois possuem açúcares simples, mais fáceis de serem utilizados pelos microrganismos.

Os materiais condicionantes contribuem com algum carbono e azoto, sendo que neste caso a palha atua tanto como agente condicionante como de suporte, dadas as dimensões das suas partículas. Ambos os materiais acima apresentam valores elevados de carbono, e relativamente ao azoto as folhas secas exibem um valor mais elevado.

Os materiais de suporte foram utilizados com o objetivo de garantir o correto arejamento da pilha. Da sua análise físico-química observa-se que contribuem também com bastante carbono, principalmente o engaço de uva.



De modo a facilitar a designação das várias amostras de biomassas recolhidas durante todo o processo, as pilhas serão referenciadas ao longo do trabalho como MB (Mistura Base) e MBE (Mistura Base + Estrume), acrescentando-se um número consoante a ordem de recolha das amostras. A Mistura Base é constituída por todas as matérias que se encontram na tabela abaixo, exceto o estrume, que foi apenas adicionado à outra pilha.

As quantidades de biomassa utilizadas que constituem as pilhas encontram-se na tabela 6:

*Tabela 6 - Quantidades utilizadas de biomassa nas pilhas*

Biomassa	% MB (V/V)	% MBE (V/V)
<b>Palha</b>	4 %	4 %
<b>Estilha</b>	5 %	5 %
<b>Engaço de Uva</b>	40 %	18 %
<b>Folhas Secas</b>	8 %	5 %
<b>Verdes</b>	40 %	15 %
<b>Borras de Café</b>	3 %	3 %
<b>Estrume de Equídeos</b>	-----	50 %
<b>Cascas de Batata e Cenoura *</b>	10 %	10 %

\*Realça-se que as cascas de batata e cenoura foram introduzidas em ambas as pilhas, algumas semanas após o início do processo

### 3.3. Caracterização do Processo de Compostagem e Evolução

A montagem do ensaio teve início no dia 29 de fevereiro, com a duração total de 5 meses, tendo sido a última amostra retirada no dia 29 de julho. O revolvimento foi manual, com o auxílio de uma pá e ancinho, e a adição de água, através de um regador, realizou-se nos dias 4, 16, 32 e 64, com o objetivo de arejar e corrigir a humidade das pilhas, respetivamente.

Como as temperaturas atingidas não foram as suficientes para um processo termófilo, no dia 16 foram adicionadas cascas de cenoura e batata, e mais tarde, ao dia 32, foi realizado um choque com nitrato de amónio e sacarose.

A sacarose é o constituinte principal do açúcar de mesa, sendo formada por uma molécula de glucose e uma de frutose. Acrescentou-se 5943 g em cada pilha, com o objetivo de fornecer carbono facilmente disponível para os microrganismos e assim, aumentar o seu metabolismo e a temperatura do processo. Já o nitrato de amónio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) detém, ao mesmo tempo, duas formas de fornecimento de azoto, a nítrica ( $\text{NO}_3$ ), e a amoniacal ( $\text{NH}_4$ ). Acrescentou-se assim 285,86 g dissolvidas em 5 L de água em cada pilha, com o objetivo de equilibrar a razão C/N.

No total foram retiradas 11 amostras de cada pilha, nos dias que se indicam na tabela 7, onde são indicados também o tipo de parâmetros analisados:

*Tabela 7 - Parâmetros analisados para cada pilha*

Nome	Dia	Parâmetros Analisados
<b>T0</b>	1	FQ; M; E
<b>T1</b>	8	FQ
<b>T2</b>	16	FQ; M; E
<b>T3</b>	16	FQ; M; E
<b>T4</b>	32	FQ; M; E
<b>T5</b>	32	FQ
<b>T6</b>	35	FQ; M
<b>T7</b>	41	FQ; M; E
<b>T8</b>	64	FQ; M; E
<b>T9</b>	67	FQ; M
<b>T10</b>	152	FQ; M; E

FQ: Análises físico-químicas; M: Análises microbiológicas; E: Análises enzimáticas

A recolha das amostras foi realizada em 9 pontos distintos, sendo eles no topo, meio e base da pilha, ao longo do seu comprimento, de modo a que a amostra resultante fosse representativa, sendo que estas foram posteriormente misturadas e convenientemente homogeneizadas para formar a amostra de cada dia.

### 3.4. Métodos de Análise

Para as amostras das biomassas recolhidas e para os compostos finais foram avaliados durante o processo de compostagem os parâmetros físico-químicos, químicos, microbiológicos, enzimáticos e ainda alguns dos parâmetros de estabilidade/maturação.

As análises às amostras recolhidas foram realizadas no laboratório de Análise de Resíduos Sólidos Biodegradáveis do Instituto Superior de Agronomia.

#### 3.4.1. Parâmetros Físicos e Físico-Químicos

##### Temperatura

A temperatura foi registada na própria pilha ao longo de todo o processo de compostagem, através de um termómetro digital, colocado a diferentes profundidades, isto é, no topo, no meio e na base da pilha, ao longo de 3 pontos sob o comprimento da mesma. Os registos foram diários, excluindo os dias de revolvimento e adição de água, onde se fizeram duas medições (antes da correção da humidade e depois do revolvimento e montagem da pilha). Os resultados foram expressos em °C.

### Massa Volúmica

A determinação da massa volúmica aparente baseou-se na Norma para a determinação do pH – EN 13037 (dezembro de 1999). Utilizou-se uma proveta de 1 L, cujo peso foi tarado antes de se proceder ao seu enchimento, tendo este sido feito para que a amostra ficasse compacta e de seguida anotou-se o peso. Os resultados são expressos em  $\text{g L}^{-1}$ .

### Teor de Humidade

O teor de humidade foi determinado tendo em conta a Norma EN 13040 (dezembro de 1999) por gravimetria após secagem numa estufa a  $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 24 h, até peso constante, de cerca de 10 g de amostra. Também foi determinado o teor de humidade em cerca de 1 g de amostra previamente seca na estufa a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  e depois moída num diâmetro de partículas de 2 mm. Os resultados foram expressos em percentagem ( $\text{g } 100\text{ g}^{-1}$ ).

### pH e Condutividade Elétrica

A determinação do pH foi de acordo com a Norma EN 13037 (dezembro 1999), por potenciometria num extrato aquoso preparado com uma quantidade equivalente a 60 mL de amostra e 300 mL de água desionizada após uma hora de agitação. A condutividade elétrica foi avaliada tendo em conta a Norma EN 13038 (dezembro 1999). Os resultados foram expressos em  $\text{mS cm}^{-1}$ .

## 3.4.2. Parâmetros Químicos

### Matéria Orgânica

A matéria orgânica foi determinada tendo em conta a Norma EN 13039 (dezembro 1999), por gravimetria após calcinação de 10 g de amostra, em mufla, a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante pelo menos 8 horas, até peso constante. Os resultados foram expressos em percentagem ( $\text{g } 100\text{ g}^{-1}$  de matéria seca).

### Carbono Orgânico Total

O carbono orgânico total foi determinado pelo método de Tinsley. A 0,0150 g da amostra seca a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  e moída, diâmetro de partículas com 2 mm, adicionou-se 25 mL de solução extrativa [(19,87 g de dicromato de sódio ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) + 200 mL de ácido ortofosfórico + 400 mL de ácido sulfúrico) / L]. A mistura, num balão Erlenmeyer com colo

esmerilado e com o tubo de refluxo, foi colocada numa placa de aquecimento e esteve em ebulição moderada durante 2 horas.

Após arrefecimento, adicionou-se cerca de 200 mL de água desionizada e 4 mL de solução indicadora [(0,3 g de difenilamina-sulfonato de bário + 58,7 g de cloreto de bário) / L]. Por fim, efetuou-se a titulação com a solução de sal de Mohr [(156,86 g de sulfato ferroso amoniacal·6H<sub>2</sub>O + 20 mL de ácido sulfúrico) / L]. Foi efetuado em simultâneo um ensaio em branco apenas com a solução extrativa e ainda um ensaio para a determinação da concentração do sal de Mohr, ambos apenas com os 25 mL da solução extrativa.

#### Azoto Amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

O azoto amoniacal foi determinado por destilação em meio alcalino (NaOH a 40 %), após extração de 50 g de amostra com 200 mL de KCL 2M com agitação durante uma hora e filtração através de papel de filtro *Schleicher & Schuell* (S&S) de banda preta. No final titulou-se o destilado com HCL de concentração conhecida. Os resultados foram expressos em mg de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> kg<sup>-1</sup> de matéria seca.

#### Azoto Nítrico (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

O azoto nítrico foi avaliado na sequência da determinação do azoto amoniacal; após a primeira destilação foram adicionados 5 mL de uma solução de sulfato de prata (AgSO<sub>4</sub> a 0,5 %) e 25 mL de uma solução de sulfato ferroso (contendo 150 g de sulfato ferroso L<sup>-1</sup> + 20 mL de ácido sulfúrico concentrado), permitindo tornar o meio redutor, tendo-se procedido seguidamente a uma nova destilação e titulação. Os resultados foram expressos em mg de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> kg<sup>-1</sup> de matéria seca.

#### Azoto Total

O azoto total foi determinado segundo a Norma EN 13654 (setembro 2001). De acordo com esta norma, para amostras com um teor de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> superior a 500 mg L<sup>-1</sup> de matéria original, a determinação de azoto total realiza-se na amostra fresca. Para teores de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> inferiores a este valor, a determinação do azoto total é feita na amostra previamente seca a 75 °C, moída e crivada a 2 mm.

Para a determinação do azoto total, a amostra foi seca a 75 °C e moída com crivo de 2 mm. Dessa amostra, pesou-se 1 g e juntou-se 10 mL de uma solução de ácido sulfúrico com ácido salicílico, ficando a atuar durante uma noite. De seguida, 1,25g de tiosulfato de sódio e 3 g de catalisador (250g de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 40g de CuSO<sub>4</sub>) foram adicionados.

Destilou-se em meio alcalino uma toma de 50 mL do extrato e depois realizou-se uma titulação. Os resultados foram expressos em percentagem (g 100 g<sup>-1</sup> de matéria seca).

### Relação C/N

A relação C/N foi calculada através da seguinte expressão:

$$Relação\ C/N = \frac{\% \text{ Carbono Total}}{\% \text{ Azoto Total}}$$

### 3.4.3. Métodos Para Determinar As Atividades Enzimáticas

#### Preparação do Extrato Aquoso

A determinação das atividades enzimáticas foi realizada, para cada amostra, em extratos aquosos preparados com 25 g de amostra em 500 mL de água destilada (Herrmann e Shann, 1993). Os resultados das atividades enzimáticas foram referidos na unidade:  $\mu\text{mol}$  de produto formado  $\text{g}^{-1}$  de matéria seca da amostra  $\text{tempo}^{-1}$ .

#### Determinação da Atividade das Celulases Totais

A atividade das celulases totais foi determinada de acordo com o método proposto por Hope e Burns (1987) modificado (substituiu-se 1 g de amostra, proposto pelos autores, por 1 mL do extrato enzimático) por Cunha-Queda (1999). O método baseia-se na determinação por espectrofotometria de absorção molecular dos açúcares redutores produzidos (expressos em  $\mu\text{mol}$  de glucose) após a incubação da amostra em presença do substrato (celulose microcristalina – Avicel®) durante 16 horas a 40 °C. A mistura reacional foi preparada com 5 mL de solução tampão acetato [77mM, pH 5,5, contendo 0,2 % (p/v) de azida de sódio], 0,5 g de Avicel e 1 mL do extrato aquoso da amostra. O doseamento dos açúcares redutores foi realizado segundo o método de Nelson e Somogyi (Spiro, 1966). Segundo Alef e Nannipieri (1995), com este método, são estimadas as celulases totais.

#### Determinação da Atividade das Proteases

A atividade das proteases foi determinada de acordo com o método proposto por Ladd e Butler (1972) modificado (substituiu-se 1 g de amostra, proposto pelos autores, por 10 mL do extrato enzimático) por Cunha-Queda (1999). Este método baseia-se na determinação por espectrofotometria de absorção molecular dos aminoácidos libertados (expressos em  $\mu\text{mol}$  de tirosina) após a incubação da amostra em presença de caseinato de sódio, durante 2 horas a 50 °C. A mistura reacional foi preparada com 10 mL do extrato aquoso da amostra aos quais se adicionaram 5 mL de solução tampão Tris 12,5 mM a pH 8,1 e 5 mL de uma solução aquosa de caseinato de sódio a 2 % (p/v).

### Determinação das Fosfatases Ácidas

A atividade das fosfatases ácidas foi determinada pelo método proposto por Tabatabai (1982) modificado por Cunha-Queda (1999). A solução tampão de reação foi preparada com p-nitrofenilfosfato ( $C_6H_4NO_6PNa_2 \cdot 6H_2O$ , Sigma 104®) 2,5 mM em tampão MUB (tampão universal modificado, Tabatabai, 1982) a pH 6,0. A reação foi realizada em tubo de ensaio contendo 1 mL de extrato enzimático, ao qual se adicionaram 3 mL do tampão de reação acima descrito, procedendo-se à incubação durante 1 hora a 37 °C, finda a qual se adicionou 1 mL de  $CaCl_2$  0,5M e 4 mL de NaOH 0,5M, seguindo-se filtração através de papel de filtro S&S de banda azul. O produto da reação (p-nitrofenol) foi determinado por absorvância a 420 nm.

### Determinação das Fosfatases Alcalinas

A atividade das fosfatases alcalinas foi determinada pelo método proposto por Tabatabai (1982) modificado por Cunha-Queda (1999). A solução tampão de reação foi preparada com p-nitrofenilfosfato ( $C_6H_4NO_6PNa_2 \cdot 6H_2O$ , Sigma 104®) 2,5 mM em tampão  $NaHCO_3$  50 mM a pH 9,0. A reação foi realizada em tubo de ensaio contendo 1 mL de extrato enzimático, ao qual se adicionaram 3 mL do tampão de reação acima descrito, após procedeu-se à incubação durante 1 hora a 37 °C, finda a qual se adicionou 1 mL de  $CaCl_2$  0,5M e 4 mL de NaOH 0,5M, seguindo-se filtração através de papel de filtro S&S de banda azul. O produto da reação (p-nitrofenol) foi determinado por absorvância a 420 nm.

#### 3.4.4. Parâmetros Microbiológicos

Na avaliação dos parâmetros microbiológicos foram seguidas de um modo geral as técnicas descritas por Pochon e Tardieux (1962).

As análises microbiológicas foram efetuadas a partir de uma suspensão preparada em frasco Erlenmeyer com 40 g de amostra em 360 mL de água destilada esterilizada (diluição - 1). As diluições sucessivas foram realizadas em tubos de ensaio contendo 9 mL de água destilada esterilizada, aos quais se adicionou 1 mL da diluição anterior.

Todos os resultados foram expressos em unidades formadoras de colônias (UFC) por grama de matéria seca de amostra.

### Bactérias Aeróbias Totais

O meio de cultura utilizado para a quantificação das bactérias aeróbias mesófilas totais foi o meio designado agar de Nutrient, com a seguinte constituição:

Tabela 8 - Constituição do meio Nutrient

<b>Nutrient (caldo) (Difco, 003)</b>	8 g
<b>Extracto de levedura (Difco, 127)</b>	5 g
<b>Agar Técnico nº3 (Oxoid, 13)</b>	20 g
<b>Água destilada</b>	1000 mL

Após a correção do valor de pH entre 7,4-7,5, o meio é esterilizado em autoclave durante 20 minutos, a 121 °C e 1 atm de pressão e, posteriormente distribuído, em condições assépticas, em placas de Petri esterilizadas.

Para a inoculação utilizaram-se 5 placas para cada diluição previamente selecionada, tendo-se pipetado para cada uma 0,2 mL de inóculo. As placas inoculadas foram a incubar a 27 °C e 44 °C durante 24 horas.

#### Fungos Filamentosos e Leveduras Totais

O meio de cultura utilizado para a análise dos fungos filamentosos e das leveduras mesófilas totais foi o meio designado agar de extrato de malte, com a seguinte constituição:

Tabela 9 - Constituição do meio extrato de malte

<b>Extrato de Malte (caldo) (Oxoid, CM57)</b>	20 g
<b>Extrato de levedura (Difco, 0127)</b>	5 g
<b>Agar Técnico nº3 (Oxoid, L13)</b>	15 g
<b>Água destilada</b>	1000 mL

Após a correção do valor de pH a 7,0, o meio é esterilizado em autoclave, durante 20 minutos, a 121 °C e 1 atm de pressão; antes da distribuição do meio nas placas de Petri esterilizadas são adicionados, em condições assépticas, 10 mL de uma solução de rifampicina contendo 1500 mg L<sup>-1</sup>, previamente preparada em água esterilizada.

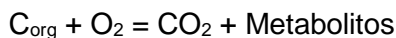
Para a inoculação utilizaram-se 5 placas para cada diluição previamente selecionada, tendo-se pipetado para cada uma 0,2 mL de inóculo. As placas inoculadas foram a incubar a 27 °C e 44 °C durante 24 horas as leveduras e 48 horas os fungos.

#### 3.4.5. Avaliação Da Estabilidade/Maturação

##### Atividade Respiratória Ao Fim De 4 Dias (AT<sub>4</sub>)

A atividade respiratória (AT) descreve a carência bioquímica de oxigénio de uma amostra sólida durante um período de observação de 4 dias. O método é baseado na medição da diferença de pressão no sistema fechado.

Durante a degradação biológica das substâncias orgânicas (carbono orgânico) pelos microrganismos, ocorre consumo de oxigénio e libertação de dióxido de carbono de acordo com a seguinte equação:



O CO<sub>2</sub> libertado é absorvido por um absorvente (KOH) colocado no frasco onde é realizado o ensaio, e conseqüentemente ocorre um decréscimo proporcional da pressão da fase gasosa no frasco, onde ocorre a reação resultante do consumo de O<sub>2</sub>. Neste sistema fechado a medição da pressão é feita independentemente da pressão atmosférica. O sistema de medição utilizado consiste num sensor eletrónico de pressão, num frasco *Schott* de 2000 mL e num dispositivo para colocar o absorvente do CO<sub>2</sub> no interior do frasco.

O teste AT<sub>4</sub> foi realizado com 20 g de amostra com a humidade corrigida a 45 %. Utilizou-se 2,5 mL de solução de hidróxido de potássio (KOH) a 45 % como absorvente do dióxido de carbono. O sistema foi incubado numa câmara termostatzada à temperatura de 20 °C durante 4 dias. Os resultados foram registados *on-line* no sensor eletrónico de pressão por leitura de infravermelho. A atividade respiratória ao fim de 4 dias (AT<sub>4</sub>) nas condições do ensaio foi expressa em mg O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de matéria seca da amostra e calculada a partir da seguinte equação:

$$AT = k_{20^{\circ}C} \times \frac{V_{GL}}{m_{MS}} \times \Delta p$$

$$k_{20^{\circ}C} \rightarrow 1,313 \text{ (mg hPa}^{-1} \text{ L}^{-1}\text{)}$$

$$\Delta p \rightarrow \text{variação de pressão (hPa)}$$

$$V_{GL} \rightarrow \text{volume de gás livre (L)}$$

$$m_{MS} \rightarrow \text{massa de matéria seca da amostra usada (g)}$$

#### Teste de Auto Aquecimento

O teste foi realizado colocando cerca de 900 g de amostra num recipiente adiabático (*Dewar flask*), durante 10 dias e mantido à temperatura ambiente (20 °C).

A temperatura foi avaliada através de um termómetro digital colocado a 2/3 da altura do contentor térmico, sendo expressa em °C. Foi determinada a classe de estabilidade com base na temperatura máxima alcançada durante o teste de auto aquecimento de acordo com a classificação Laga-Merkblatt M10 (1995).

### 3.5. Análise Estatística Dos Resultados



A análise estatística dos resultados obtidos foi realizada através de uma análise de variância com base no modelo one way e fatorial ANOVA, utilizando  $\alpha = 0,05$ , com o *software Statistica* (versão 13) para *Windows*. Utilizou-se o teste de Tukey para a separação de médias ao mesmo nível de significância.

## Capítulo 4 – Análise e Discussão de Resultados

### Temperatura

Nas figuras 13 e 14 são apresentadas as evoluções da temperatura medida no topo, meio e base das pilhas MB e MBE, bem como a média destes 3 pontos e a temperatura ambiente.

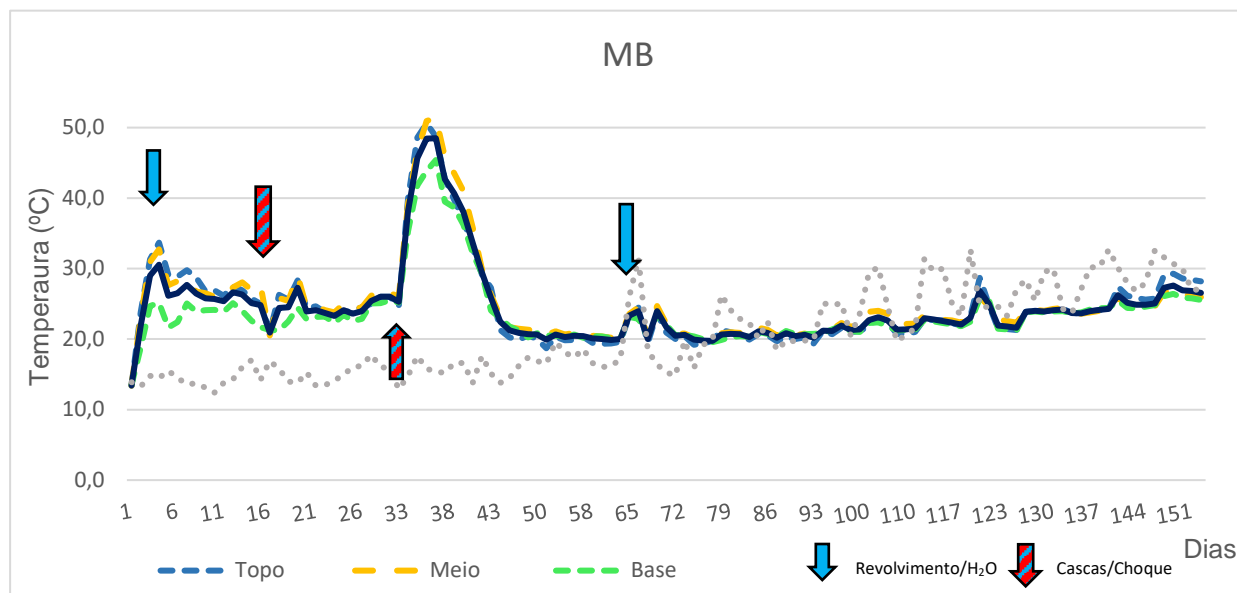


Figura 13 - Evolução da temperatura na pilha MB

Da observação do gráfico da pilha MB, observa-se que não existiu uma grande variação entre os três pontos onde foi amostrada a temperatura, notando-se que, em quase todos os dias, o interior da pilha era mais quente que as extremidades, estando, portanto, em conformidade com a afirmação de Russo (2003), que refere que numa pilha as temperaturas desenvolvem-se do interior para o exterior de forma decrescente.

A temperatura média inicial foi de 13,4 °C, tendo atingido uma temperatura máxima de 40,7 °C no dia 4, bem no centro da pilha. Visto que não se atingiu a fase termófila, ao fim de alguns dias foram introduzidas cascas de batata e cenoura, tendo a temperatura máxima atingido 33,5 °C, no dia 19, também no centro da pilha. Uma vez mais, a temperatura não ascendeu à característica da fase termófila, pelo que se realizou um choque com sacarose e nitrato de amónio. Após o choque, registou-se, no meio da pilha, a temperatura mais elevada do processo, com 56 °C, no dia 36, tendo tido a fase termófila uma duração de 4 dias. Considera-se que a fase mesófila final teve início no dia 41, pois não se verificou, em nenhum ponto da pilha, uma temperatura superior a 40 °C. A temperatura média da pilha acaba por

estabilizar próxima da temperatura ambiente, apresentando alguns pequenos picos devido às flutuações meteorológicas.

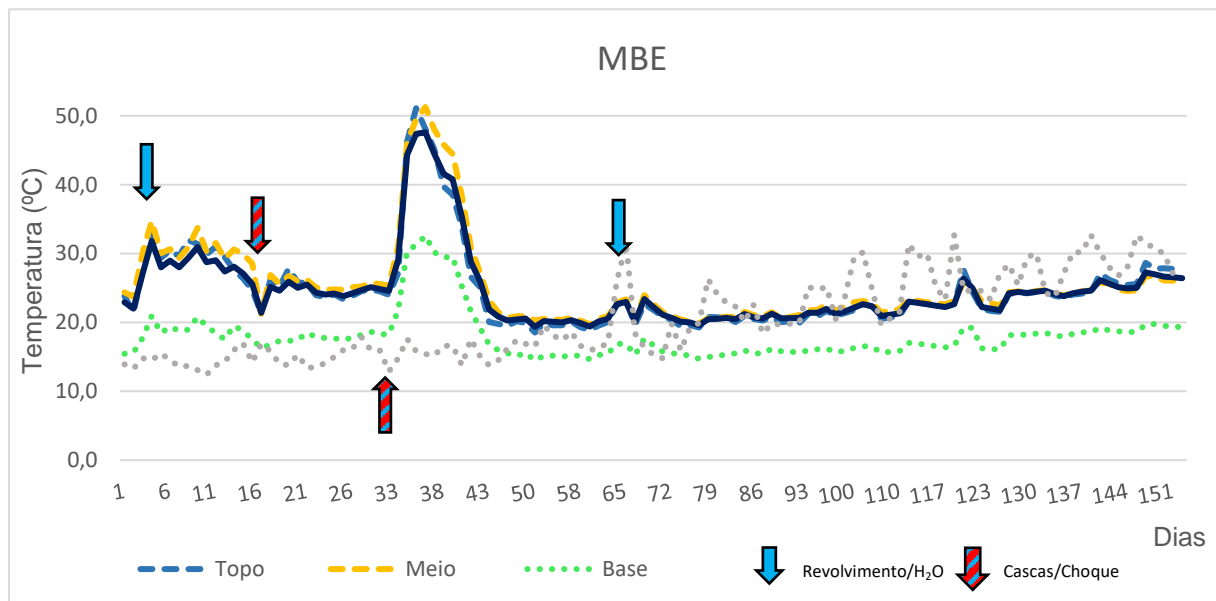


Figura 14 - Evolução da temperatura na pilha MBE

Da observação do gráfico da pilha MBE, nota-se que existiu uma amplitude maior entre a temperatura na base da pilha e as restantes, o que poderá indicar que nesta zona o material tinha menor capacidade de conservação do calor. Nota-se ainda que, em quase todos os dias, o interior da pilha era mais quente do que nas zonas mais exteriores.

A temperatura média inicial foi de 22,9 °C, tendo atingido uma temperatura máxima de 39,6 °C no dia 9, no centro da pilha. Dado que aconteceu o mesmo que na pilha anterior, ao acrescentar as cascas de batata e cenoura, a temperatura máxima atingida foi de 32,8 °C no dia 18. Uma vez mais, não se ultrapassou a temperatura pretendida, pelo que apenas após o choque com sacarose e nitrato de amónio, a temperatura máxima atingida no centro da pilha foi de 55,8 °C, no dia 35, tendo a fase termófila uma duração de 5 dias. Neste caso, a fase mesófila final teve início também no dia 41, após a qual se iniciou a estabilização da temperatura próxima da temperatura ambiente.

Na figura 15, apresentam-se as temperaturas médias das duas pilhas, bem como a temperatura ambiente registadas.

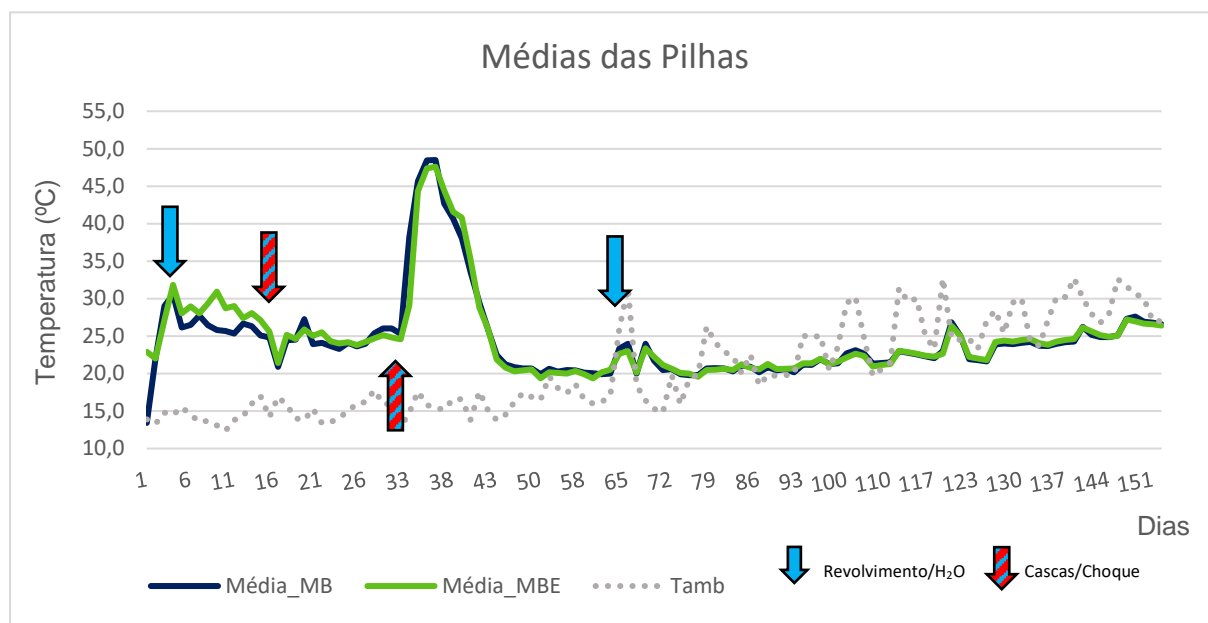


Figura 15 - Evolução da temperatura média das duas pilhas

Da análise da figura 15 observa-se que a média das temperaturas manteve-se semelhante nas duas pilhas, embora no início do processo a pilha MBE tivesse registado temperaturas ligeiramente superiores. Isto aconteceu porque o estrume introduzido na pilha MBE não era fresco, mas que apesar disso contribuiu com uma maior diversidade de materiais suscetíveis de serem utilizados pelos microrganismos. Ainda nos primeiros dias do processo, a introdução das cascas teve um efeito mais acentuado na pilha MBE. Após o choque, ambas as pilhas atingiram temperaturas semelhantes, sendo que a pilha sem estrume atingiu a temperatura mais elevada. O perfil de ambas na fase mesófila final foi idêntico, registando-se flutuações devidas à temperatura ambiente nos mesmos tempos. No que toca à duração das fases de compostagem, tanto as fases mesófilas iniciais e finais, e a fase termófila nas duas pilhas, ocorreram durante um período de tempo idêntico, tendo a pilha MBE apenas um dia a mais de fase termófila.

É de salientar que as oscilações verificadas ao longo do tempo podem ser explicadas pelo facto de as pilhas terem sido colocadas num recinto coberto, mas ao ar livre, durante o período de inverno/primavera, pelo que as variações meteorológicas têm uma influência considerável na temperatura da pilha. Esta suscetibilidade deve-se à sua reduzida dimensão, pelo que a conservação de calor no seu interior se torna mais difícil. É possível verificar que em determinados picos da temperatura ambiente coincidem também picos nas temperaturas das pilhas.

Destaca-se que ao 8º dia de compostagem na pilha MB e ao 10º dia da pilha MBE, começaram a germinar sementes de infestantes. Isto deve-se ao facto de as temperaturas iniciais nunca terem atingido a fase termófila, pelo que não se inviabilizaram as sementes que a mistura continha, proveniente dos resíduos verdes (figura 16).



*Figura 16 - Pormenor das sementes germinadas nas pilhas*

Em virtude de se ter verificado a germinação das sementes, pensou-se numa forma de resolver esta situação pela ação de introduzir um material que promovesse o aumento da temperatura das pilhas, tendo sido realizado o choque com a solução de sacarose e nitrato de amónio para o efeito. Ao segundo mês de compostagem e já após o choque, ainda se verificou a germinação de algumas sementes, mais na pilha MBE que na MB, embora com muito menor expressão que no mês anterior. Esta segunda germinação deve-se ao facto de a fase termófila, apesar das temperaturas elevadas, ter sido muito curta, pelo que não foi suficiente para inviabilizar completamente as sementes presentes (figura 17).



*Figura 17 - Pormenor da segunda germinação das sementes nas pilhas*

Em relação aos parâmetros físico-químicos estudados, a tabela 10 apresenta os resultados obtidos para a pilha MB e a tabela 11 para a pilha MBE.

*Tabela 10 - Valores dos parâmetros físico-químicos da pilha MB*

m.s. – valores referidos à matéria seca

\*as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para

	<b>MB 0</b>	<b>MB 2</b>	<b>MB 3</b>	<b>MB 4</b>	<b>MB 5</b>	<b>MB 7</b>	<b>MB 8</b>	<b>MB 10</b>
<b>Humidade (%)</b>	74,37 ab*	74,43 ab	75,87 a	70,08 abc	67,47 bc	65,34 c	57,08 d	49,20 d
<b>MO (% m.s.)</b>	86,79 a	80,09 ab	84,64 a	81,17 a	86,59 a	77,91 ab	80,51 ab	71,11 b
<b>pH</b>	5,90 a	7,99 b	7,56 c	7,97 b	6,33 d	8,92 e	7,23 f	6,48 d
<b>CE (mS cm<sup>-1</sup>)</b>	0,37 a	0,37 a	0,34 a	0,33 a	0,85 b	0,56 c	0,61 c	1,28 d
<b>Carbono Orgânico Total (% m.s.)</b>	38,56 ab	42,99 b	38,03 ab	32,58 a	37,28 ab	36,77 ab	24,07 c	39,56 ab
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	516,83 a	574,59 a	632,27 ab	574,74 a	956,64 c	955,65 c	699,61 b	371,51 d
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	641,13 a	267,25 b	466,36 c	780,92 ad	975,74 e	405,90 bc	1850,70 f	883,95 de
<b>N<sub>t</sub> (% m.s.)</b>	1,40 a	1,85 b	1,67 b	1,66 b	1,72 b	2,16 c	2,10 c	2,38 d
<b>C/N</b>	27,56 a	23,41 b	22,81 b	19,62 bc	21,62 b	17,05 c	11,49 d	16,60 c
<b>AT<sub>4</sub> (mg O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> m.s.)</b>	23,43 ad	15,94 b	21,20 a	10,40 c	24,74 d	14,09 be	15,70 b	11,88 ce

$\alpha=0,05$

O teor de humidade inicial encontra-se acima do valor ótimo, tendo decrescido ao longo do processo, apenas decrescendo significativamente a partir da amostra T8. Isto aconteceu uma vez que se registou as temperaturas mais altas a partir da amostra T5, momento esse em que foi realizado o choque e após o qual se registaram as temperaturas termófilas. Nas amostras T2 e T4 o teor de humidade não decresceu significativamente não só porque as temperaturas atingidas não foram muito elevadas, como foram realizadas correções do teor de humidade, concordante com Vallini (1995) que afirma que a diminuição verificada no teor de humidade durante a compostagem é devida ao consumo de água por parte dos microrganismos, perdas por lixiviação e evaporação favorecida pelas operações de revolvimento e de arejamento das biomassas.

O teor de matéria orgânica variou ao longo do processo, consoante os tempos em que se acrescentou materiais à pilha, nomeadamente as cascas em T3 e o choque em T5. A maior diminuição verificou-se entre as amostras T8 e T10.

Quanto aos valores de pH, entre as duas primeiras amostras dá-se um aumento significativo, que pode estar relacionado com o pH dos materiais iniciais, pois alguns eram

bastante baixos, principalmente o do engajo de uva. O pH, após diminuir nas amostras seguintes, volta a aumentar significativamente na amostra T7, após a qual diminui até valores próximos da neutralidade. Este fenómeno verifica-se após a adição de azoto e da elevação da temperatura das biomassas, com a consequente alcalinização devida à produção de azoto na forma amoniacal, o qual foi resultante da hidrólise do azoto orgânico por intermédio de microrganismos aminizantes e amonificantes. A evolução do pH segue assim a curva típica de evolução durante o processo de compostagem

A condutividade elétrica aumenta significativamente a partir da amostra T5, voltando a diminuir na amostra T7 e aumentando significativamente na amostra T10. De acordo com Raviv *et al.* (1987), o aumento da condutividade elétrica ao longo do processo de compostagem é resultado da mineralização parcial da matéria orgânica, originando o aumento do teor de sais minerais na matriz em compostagem. O aumento deve-se à pilha ter estado tantos dias sem se realizar a adição de água, resultando numa maior concentração do teor de sais minerais na matriz em compostagem, bem como a uma diminuição da matéria orgânica. Embora não se verifique esta interação entre a mineralização da matéria orgânica e o aumento da condutividade elétrica, verifica-se sim uma maior interação com a humidade da pilha, que diminui à medida que a condutividade elétrica aumenta.

Os valores de azoto amoniacal foram aumentando, tendo-se verificado um aumento significativo em T5, principalmente devido à introdução de nitrato de amónio. Nos tempos seguintes, o valor foi decrescendo significativamente, coincidindo com o aumento da temperatura ambiente e com a estabilização do pH, o que pode indicar que o azoto se perdeu por volatilização. No que diz respeito aos valores de azoto nítrico, este diminui significativamente entre as primeiras amostras, voltando a aumentar até T5, tendo atingido o valor máximo em T8. Cunha-Queda (1999) refere que durante o processo de compostagem ocorre outra transformação, a conversão do azoto amoniacal em azoto nítrico. Com esta transformação diminui o azoto na forma  $\text{NH}_4^+$  e aumenta nas formas  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NO}_2^-$ .

O valor de azoto total diminui significativamente entre as duas primeiras amostras, coincidindo com a diminuição do azoto nítrico. O aumento significativo a partir de T7, coincide com a subida do azoto amoniacal e posteriormente do azoto nítrico, tendo aumentado até ao último dia do ensaio, onde se atingiu um valor superior ao verificado na biomassa inicial.

A relação C/N diminuiu significativamente entre a primeira e a segunda amostra, voltando a diminuir em T7 e T8, onde se registou o teor de carbono orgânico mais baixo. Seguidamente, embora aumente também a quantidade de azoto total, o aumento do teor de carbono orgânico provoca uma subida significativa da relação C/N na última amostra.

No que respeita aos valores de  $AT_4$ , verificam-se diferenças significativas ao longo do processo de compostagem, fundamentalmente nos tempos em que foram introduzidos materiais à pilha. Apesar do valor no composto final ser ligeiramente superior a  $10 \text{ mg O}_2 \text{ g}^{-1}$  de matéria seca, pode considerar-se que o material se encontra praticamente estabilizado, devido à diferença entre este e o valor da amostra inicial.

*Tabela 11 - Valores dos parâmetros físico-químicos da pilha MBE*

	<b>MBE 0</b>	<b>MBE 2</b>	<b>MBE 3</b>	<b>MBE 4</b>	<b>MBE 5</b>	<b>MBE 7</b>	<b>MBE 8</b>	<b>MBE 10</b>
<b>Humidade (%)</b>	74,23 a*	72,72 ab	70,52 ab	59,32 c	67,63 b	55,73 c	57,53 c	52,13 c
<b>MO (% m.s.)</b>	78,46 a	79,73 a	48,73 b	39,16 b	66,35 c	42,59 b	42,20 b	76,60 ac
<b>pH</b>	6,35 a	7,67 bc	7,47 b	7,97 cd	6,33 a	8,14 d	7,33 b	5,87 e
<b>CE (mS cm<sup>-1</sup>)</b>	0,31 abd	0,27 abd	0,26 ab	0,23 a	0,66 c	0,43 bd	0,43 d	1,011 e
<b>Carbono Orgânico Total (% m.s.)</b>	30,80 a	25,47 abc	28,95 a	28,44 a	26,14 ac	21,36 bc	13,36 d	19,60 b
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	589,16 a	401,47 b	438,60 b	407,47 b	633,18 a	354,11 b	365,76 b	133,46 c
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	439,58 ac	391,91 a	292,40 ab	615,73 c	1125,13 d	195,89 b	1062,52 d	1000,13 d
<b>N<sub>t</sub> (% m.s.)</b>	1,22 a	1,39 b	1,31 ab	1,34 ab	1,37 b	1,28 ab	1,28 ab	1,40 b
<b>C/N</b>	25,28 a	18,41 bc	22,07 ab	21,20 ab	19,18 bc	16,68 bc	10,42 d	14,03 cd
<b>AT<sub>4</sub> (mg O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> m.s.)</b>	18,58 ae	15,07 b	16,44 ab	11,05 c	25,77 d	20,57 e	14,27 b	10,80 c

m.s. – valores referidos à matéria seca

\* as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para  $\alpha=0,05$

O teor de humidade inicial apresenta-se acima do valor ótimo, tendo diminuído ao longo do processo, verificando-se apenas pequenos aumentos nos tempos em que se corrigiu o teor de humidade. A maior diminuição verificou-se entre as amostras T3 e T4, momento anterior à realização do choque, em que as temperaturas atingidas rondavam os 30 °C.

O teor de matéria orgânica variou significativamente, principalmente após a adição das cascas, onde se registou a maior diminuição do valor, e após o choque. Salienta-se que, dado o valor não esperado em T10, considera-se que este se trata de um erro de amostragem, tendo em conta a evolução anterior do parâmetro.

Quanto aos valores de pH, estes mantêm-se próximos da neutralidade, havendo diferenças significativas da amostra inicial para a seguinte, e ocorrendo também um aumento significativo de T5 para T7, verificando-se nesta última o valor mais alcalino.



A condutividade elétrica aumenta significativamente de T4 para T5, voltando a decrescer até T8, e aumentando em T10, pelo que não acompanha os tempos em que se deu uma maior mineralização da matéria orgânica.

Os valores de azoto amoniacal não variaram muito, verificando-se uma diminuição significativa da primeira para a segunda amostra, voltando a aumentar em T5, e diminuindo nas amostras seguintes, registrando-se o valor mais baixo na última amostra. Os valores de azoto nítrico seguem uma tendência contrária ao anterior, diminuindo até à amostra T3 e voltando a aumentar significativamente na T4. Diminuem significativamente na amostra T7, aquando do choque, e volta a aumentar significativamente em T8, a partir da qual não se altera.

Os valores de azoto total não se alteraram significativamente entre si, sendo que no último dia de ensaio apresenta um valor superior ao da biomassa inicial.

A relação C/N diminuiu entre a amostra inicial e a seguinte, resultado da diminuição do teor de carbono orgânico total. Apenas volta a diminuir significativamente em T8, e aumentando ligeiramente na última amostra, valor esse que se encontra muito baixo, sobretudo devido ao reduzido valor verificado no carbono orgânico, visto que o azoto total também se encontra baixo.

No que respeita aos valores de AT<sub>4</sub>, ocorre uma grande variação entre a biomassa inicial e o composto final, pelo que se considera que a matéria se encontra estabilizada.

Por forma a analisar a evolução de ambas as pilhas nos mesmos tempos, no anexo III encontra-se a análise de interação entre os parâmetros físico-químicos das mesmas.

Do anexo, observa-se que em T4 a pilha MBE perde bastante humidade, o que não se verifica na pilha MB. Em termos de matéria orgânica, apenas a pilha MBE diminui significativamente em T3, apresentando a partir daí evoluções diferentes. Para o carbono orgânico total e o azoto amoniacal, as pilhas diferem significativamente logo em T2, mantendo-se diferentes até ao fim do processo, e em termos de azoto total não existem semelhanças significativas em nenhum dos tempos.

A tabela 12 demonstra as diferenças em termos dos compostos finais retirados de cada uma das pilhas.

*Tabela 12- Interação entre os compostos finais das duas pilhas*

MB 10	MBE 10

<b>Humidade (%)</b>	49,20 a*	52,13 a
<b>MO (% m.s.)</b>	71,11 a	76,60 a
<b>pH</b>	6,48 a	5,87 a
<b>CE (mS cm<sup>-1</sup>)</b>	1,28 a	1,01 b
<b>Carbono Orgânico Total (% m.s.)</b>	39,56 a	19,60 b
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	344,47 a	133,46 b
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg kg<sup>-1</sup> m.s.)</b>	950,85 a	1000,13 a
<b>N<sub>t</sub> (% m.s.)</b>	2,38 a	1,40 b
<b>C/N</b>	16,60 a	14,03 a
<b>AT<sub>4</sub> (mg O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> m.s.)</b>	11,88 a	10,80 a
<b>Teste Autoaquecimento</b>	22,5 °C	21,0 °C

\* as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para  $\alpha=0,05$

Como se observa, encontram-se diferenças significativas na condutividade elétrica, no teor de carbono orgânico total, no azoto amoniacal e total. De realçar que apesar de não se notarem diferenças significativas na matéria orgânica, considerou-se que houve um erro de amostragem para a pilha MBE, pelo que a evolução mostra que esse valor deveria ser mais baixo, o que é corroborado pelo valor encontrado para o teor de carbono orgânico total.

Segundo os valores indicados no Decreto-Lei 103/2015 a humidade de ambos os compostos apresenta-se mais elevada em relação ao valor de referência (inferior a 40 %). O teor de matéria orgânica está em conformidade com o valor de referência, que deverá ser superior a 30 %, e o valor de pH em ambas as pilhas também se encontra dentro da gama de valores, ou seja, entre 5,5 e 9,0.

Relativamente à estabilidade dos compostos finais de ambas as pilhas, no teste do autoaquecimento registou-se como temperatura máxima 22,5 °C para a pilha MB e 21,0 °C para a pilha MBE, correspondendo ambas à classe de estabilidade V (composto maturado).

### Populações Microbianas

No que diz respeito à análise das populações microbianas, na tabela 13 são apresentados os resultados obtidos para ambas as pilhas.

Tabela 13- Evolução da atividade microbiológica nas pilhas MB e MBE

			T0	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T9	T10
B A C T É R I A S	27 °C	MB	8,99 a*	9,07 a	8,85 a	8,16 b	8,66 a	9,07 a	8,85 a	8,66 a	8,14 b
		MBE	5,74 a	7,91 b	8,13 b	8,28 b	7,88 b	7,96 b	8,22 b	8,56 b	7,89 b
	44 °C	MB	7,97 ac	8,46 be	7,93 ac	7,69 c	8,24 ab	9,03 d	9,03 d	8,84 de	8,34 ab
		MBE	7,85 ab	7,85 ab	7,83 ab	7,30 a	8,14 bc	8,94 d	9,00 d	8,68 cd	7,85 ab
L E V E D U R A S	27 °C	MB	6,23 a	6,23 a	5,40 b	5,81 c	5,42 bc	6,44 a	6,37 a	6,94 d	4,90 e
		MBE	6,40 a	5,09 be	7,01 c	4,98 b	5,86 d	5,71 d	5,81 d	6,49 a	5,47 de
	44 °C	MB	4,29 a	5,38 b	3,79 c	0,00 d	0,00 d	4,20 e	5,28 b	7,11 e	5,27 b
		MBE	4,35 a	5,17 be	5,69 c	0,00 d	4,82 e	7,08 f	4,32 bc	6,47 g	5,29 bc
F U N G O S	27 °C	MB	5,50 a	6,35 bc	6,08 b	5,34 a	6,36 bc	7,01 d	7,17 d	6,24 b	6,62 c
		MBE	5,98 ab	5,90 abe	6,16 abc	5,26 d	5,77 ae	6,16 abc	6,59 c	5,54 de	6,31 bc
	44 °C	MB	5,02 a	5,68 b	4,85 a	4,12 c	5,99 d	6,69 e	7,31 f	0,00 g	6,18 d
		MBE	4,62 a	5,72 b	5,71 b	5,36 cd	5,54 bd	6,59 e	6,55 e	3,08 c	6,06 f

Resultados expressos em Log<sub>10</sub>(UFC g<sup>-1</sup> matéria seca)

\*as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para α=0,05

Da tabela acima, para a pilha MB, observa-se que o número de bactérias mesófilas totais diminuiu significativamente na amostra T4, após a qual aumenta, até voltar a diminuir a partir de T8. Já para a pilha MBE, a atividade das bactérias aumenta da primeira para a segunda amostra, após a qual não se encontram diferenças significativas.

Relativamente às bactérias termófilas totais, na pilha MB verificam-se que aumentaram da amostra inicial para a T2, após a qual diminuem e voltam a subir em T6, atingindo o valor mais elevado em T7 e T8. Para a pilha MBE, o número de bactérias aumenta a partir de T6, atingindo o valor máximo em T8, após o qual volta a diminuir.

Para as leveduras mesófilas totais, na pilha MB, verifica-se uma diminuição significativa até à amostra T6, após a qual aumentou significativamente, atingindo o valor máximo na amostra T9. Na pilha MBE, verifica-se um aumento significativo do número de leveduras na amostra T3, diminuindo logo de seguida em T4 e aumentando novamente até T9, para valores semelhantes à da amostra inicial, o que poderá indiciar condições de anaerobiose. Quanto às leveduras termófilas totais, verificou-se uma diminuição na amostra T3 e o valor mais elevado na amostra T9, para a pilha MB. Para a outra pilha, o valor mais elevado registou-se na amostra T7.

Em relação aos fungos mesófilos totais, ambas as pilhas apresentam uma evolução semelhante, sendo os valores mais elevados na amostra T8. Para os fungos termófilos totais, na pilha MB regista-se um aumento significativo em T2, após o qual diminui até T4, voltando a aumentar significativamente, atingindo o seu máximo em T8. Na pilha MBE, há a registar o valor máximo atingido em T7, uma diminuição significativa em T9 e um aumento novamente em T10.

No anexo IV encontra-se a análise de interações entre os parâmetros microbiológicos de ambas as pilhas.

Ao nível das bactérias mesófilas encontra-se logo diferenças significativas na amostra inicial, voltando a diferir em T6 e T7, altura em que foi realizado o choque e se atingiu o pico de temperatura, respetivamente. Em termos de leveduras mesófilas, estas apenas não diferem significativamente na amostra inicial, sendo diferentes no resto do processo. Tanto para os fungos mesófilos como para os termófilos, ambos apresentam uma evolução muito diferente.

Nos compostos finais verificou-se a presença de macrorganismos, nomeadamente centopeias, minhocas e, em maior número bichos-da-conta (figura 18).



*Figura 18 - Pormenor dos macrorganismos observados na pilha MB (esquerda) e na MBE (direita)*

### Atividade Enzimática

No que diz respeito à análise da atividade enzimática, na tabela 14 são apresentados os resultados obtidos para ambas as pilhas.

Tabela 14- Valores da atividade enzimática das pilhas MB e MBE

		T0	T2	T3	T4	T7	T8	T10
<b>Fosf. Ácidas (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	3,95 a*	4,03 a	4,06 a	3,53 b	2,46 b	2,34 b	2,04 c
	<b>MBE</b>	3,54 a	3,64 a	3,35 a	3,49 a	2,25 b	2,23 b	1,70 c
<b>Fosf. Alcalinas (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	3,44 ab	4,12 c	3,87 bc	3,66 ab	3,23 ad	2,88 d	2,08 e
	<b>MBE</b>	3,04 a	3,45 b	3,31 b	3,46 b	2,36 c	2,33 c	1,63 d
<b>Celulases (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	4,67 ac	4,24 a	3,89 ab	4,11 a	5,17 c	3,12 b	2,15 d
	<b>MBE</b>	3,60 a	3,50 a	3,46 a	3,53 a	2,88 b	2,56 b	1,51 c
<b>Proteases (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	3,40 a	3,49 b	3,38 c	2,99 d	2,44 e	2,18 f	1,91 g
	<b>MBE</b>	2,99 a	3,04 b	3,14 c	3,03 b	2,23 d	2,20 e	1,57 f

\* as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para  $\alpha=0,05$

A atividade das fosfatases ácidas na pilha MB apenas diminuiu significativamente a partir da amostra T4, no entanto, na amostra T2 registou-se um aumento significativo do valor de pH. Note-se que o valor mais elevado do pH não corresponde ao valor mínimo da atividade das fosfatases ácidas. No caso da pilha MBE, registou-se uma diminuição significativa a partir da amostra T7. Em relação ao pH, ocorreu um aumento significativo na amostra T2, o que não é visível na atividade das fosfatases. De realçar que o valor de pH mais baixo corresponde ao mínimo de atividade das fosfatases ácidas. Em ambas as pilhas a atividade das fosfatases ácidas é maior no início do que no fim do processo, o que está de acordo com estudos realizados por Ayuso *et al.* (1996).

No que diz respeito às fosfatases alcalinas, para a pilha MB, existe uma variação não muito significativa ao início, que varia conforme o pH, exceto em T2, onde se regista o valor máximo, no entanto, a partir de T4 o pH aumenta significativamente, não existindo essa evidência na atividade das fosfatases. O pH volta a diminuir e esse decréscimo já se encontra evidenciado. No caso da pilha MBE, encontram-se variações da atividade, que são justificadas com a variação do pH, no entanto, em T7, a atividade decresce significativamente, sendo que o pH aumenta significativamente. Verifica-se ainda que em ambas as pilhas a atividade das fosfatases alcalinas é superior na biomassa inicial.

Na pilha MB, a atividade das celulasas começa logo por ser elevada, demonstrando que os materiais iniciais continham populações microbiológicas adaptadas à decomposição da celulose. Esta atividade sobe significativamente em T7, altura em que se registou a

temperatura mais elevada, para depois voltar a decrescer significativamente. Na pilha MBE, verifica-se uma diminuição significativa da atividade em T7 e em T10. No entanto, em termos de matéria orgânica, verificou-se uma diminuição significativa em T3, um aumento em T5 e T10 que não são verificados na atividade das celulasas.

No caso das proteases, na pilha MB, verifica-se um máximo em T2, a partir do qual decresce significativamente em todas as outras amostras. Como as proteases quebram ligações peptídicas entre os aminoácidos, consoante estas diminuem, aumenta a quantidade de azoto amoniacal que, neste caso, apenas regista aumento significativo em T7, a partir do qual diminui. Na pilha MBE, a atividade das proteases aumenta significativamente até T3, a partir da qual diminui significativamente até ao composto final. Analisando o azoto amoniacal, este diminui significativamente em T2, aumentando em T5 e voltando a diminuir a partir deste ponto. É de notar que a atividade das proteases nas duas pilhas é maior no início do que no final do processo.

A atividade enzimática global nos compostos obtidos foi inferior à da biomassa inicial o que, associado às temperaturas e à atividade microbiana, indica que foi alcançada a estabilização dos materiais iniciais.

É de referir que nos primeiros dias do processo se verificou a ocorrência de basidiomicetas na pilha MBE (figura 19).



*Figura 19 - Pormenor da formação de basidiomicetas na pilha MBE*

No anexo V encontra-se a análise das interações entre os parâmetros enzimáticos das duas pilhas.

No que respeita à evolução das fosfatases ácidas nas duas pilhas, encontram-se diferenças significativas na amostra inicial, bem como nos tempos T6 e T7. Para as fosfatases alcalinas, apenas não diferem em T4. Ao nível das celulasas, as pilhas demonstram diferenças significativas na amostra inicial, sendo a atividade da pilha MB mais elevada

também em T2 e T7. Já no caso das proteases encontram-se diferenças significativas ao longo de todo o processo.

#### Correlações entre os parâmetros físico-químicos, microbiológicos e enzimáticos

Nos anexos VI e VII são apresentados os coeficientes de correlação significativos estabelecidos entre todos os parâmetros estudados nos diferentes compostos, para as pilhas MB e MBE, respetivamente.

A observação das correlações positivas significativas comuns para ambas as pilhas mostra que à medida que a humidade decresce a atividade das fosfatases ácidas e alcalinas, celulasas e proteases diminui. Situação oposta é verificada para a condutividade elétrica que apresenta correlações negativas significativas com a atividade das fosfatases alcalinas, celulasas e proteases, indicando que à medida que a condutividade elétrica aumenta a atividade destas enzimas decresce. Outro resultado comum interessante é que a relação C/N está correlacionada negativamente com o azoto nítrico, indicando que à medida que a relação C/N diminui o azoto nítrico aumenta. Os resultados mostram ainda que existe uma correlação significativa positiva entre a relação C/N e o carbono orgânico total, ou seja, à medida que o carbono orgânico total diminui, a relação C/N diminui também.

Para as diferentes enzimas estudadas verifica-se que existem correlações significativas positivas comuns entre as duas pilhas, assim, as fosfatases ácidas aumentam quando as fosfatases alcalinas e as proteases aumentam. Também se verifica que as fosfatases alcalinas aumentam quando as celulasas e proteases aumentam.



## Capítulo 5 – Conclusões e Perspetivas Futuras

Através do estudo realizado, é possível afirmar que a compostagem, como processo de valorização de resíduos orgânicos, é uma alternativa adequada de gestão e tratamento destes materiais, provenientes das mais diversas atividades praticadas na Tapada da Ajuda.

Com base nos resultados obtidos e discutidos, pode-se aferir as conclusões que se seguem.

O tamanho reduzido das pilhas não foi favorável à conservação de calor, pelo que se tornaram suscetíveis às variações meteorológicas, e consequentemente dificultaram que se atingissem as temperaturas termófilas.

A introdução do estrume numa das pilhas não trouxe os benefícios espectáveis, pelo que é importante ter em consideração o estado de degradação dos materiais. No caso de matérias suscetíveis de conterem sementes, é possível utilizar numa fase precoce um coadjuvante que permita alcançar a fase termófila plena e que inative as mesmas.

Em termos de análise físico-química, ambas as pilhas apresentaram evoluções distintas nos diversos parâmetros. No entanto, nos compostos finais encontram-se alguns parâmetros que não diferem significativamente, sendo que ambos se encontram estáveis.

Em termos de análise microbiológica, para todos os microrganismos estudados as pilhas apresentaram evoluções muito diferentes. Relativamente à análise enzimática, apenas algumas das enzimas estudadas em ambas as pilhas apresentaram um perfil evolutivo semelhante.

Ao nível das correlações encontradas entre todos os parâmetros estudados, foram encontrados pontos comuns, quer positivos quer negativos, em ambas as pilhas.

Como perspetivas de trabalho futuro, sugere-se que sejam realizados testes de fitotoxicidade, nomeadamente os índices de germinação e de crescimento, de modo a avaliar os possíveis efeitos fitotóxicos dos compostos a aplicar, bem como análises aos elementos minerais, metais pesados e análise granulométrica, de modo a avaliar se os compostos produzidos poderão ser utilizados com segurança nas culturas efetuadas na Tapada da Ajuda. Sugere-se também que caso se implemente um sistema de compostagem na Tapada da Ajuda, que se proteja a pilha das variações meteorológicas e que esta tenha dimensões superiores às estudadas, pois considerou-se que foi um entrave ao aumento da temperatura. Pensa-se que também é de grande importância fazer um estudo de levantamento de quantidades de resíduos produzidos na Tapada, de modo a serem considerados todos os tipos de resíduos gerados e as possibilidades de utilização.



Por fim, é sempre imprescindível que sejam realizados estudos integrados que comprovem a viabilidade de implementação do processo, quer em termos económicos quer ambientais.

## Capítulo 6 – Referências Bibliográficas

- Anónimo (2008) Especificações Técnicas sobre Qualidade e utilizações do Composto, 19 pp.
- ADANI, F., GENEVINI, P.L., GASPERI, F., ZORZI, G. (1997). Organic matter evolution index (OMEI) as a measure of composting efficiency. *Compost Sci. Util.*, **5**(2): 53-62.
- AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE (2014). PERSU 2020 Avaliação ambiental. Relatório final, nº relatório EEP 07.14-14/06.06
- AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE (2015) Relatório do Estado do Ambiente 2014, Portugal.
- AYUSO, M., HERNÁNDEZ, T., GARCÍA, C. PASCUAL, J.A. (1996). Biochemical and chemical-structure characterization of different organic materials used as manures. *Bioresour. Technol.*, **57**(2): 201-207.
- BATISTA, J.G.F., BATISTA, E.R.B. (2007) *Compostagem – Utilização em horticultura*. Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo, Açores, 252 pp (cit. Cordeiro, 2010).
- BRITO, L.M.C.MM (2005) Manual de Compostagem. Escola Superior Agrária de Ponte de Lma, Instituto Politécnico de Viana do Castelo. Disponível em: [http://www.ci.esapl.pt/mbrito/compostagem/Manual\\_Compostagem.htm](http://www.ci.esapl.pt/mbrito/compostagem/Manual_Compostagem.htm). Consultado a: 13 de abril de 2016.
- BUCHANAN, M., BRINITON, W., SHIELDS, F., WEST, J., THOMPSON, W., COTTON, M. (2002) The CCCQC Compost Maturity Index. In: *Composting and compost utilization, 2002 International Symposium*. Ohio, USA (cit. Gonçalves, 2002).
- ClAVATTA, C., GOVI, M., PASOTTI, L., SEQUI, P. (1993a). Changes in organic matter during stabilization of compost from municipal solid wastes. *Bioresour. Technol.*, **43**: 141-145.
- ClAVATTA, C., GOVI, M., SEQUI, P. (1993b). Characterization of organic matter in compost produced with municipal solid wastes: an Italian approach. *Compost Sci. Util.*, **1**(1): 75-81.
- CINTRA, G.D.C. (2003) *Compostagem de diferentes materiais. Monitorização e comparação de pilhas com razões carbono/azoto diferentes*. Trabalho de Fim de Curso de Engenharia Alimentar, ISA, Lisboa, 78 pp.
- CORDOVIL, C. (2003). Previsão da disponibilidade de azoto para as plantas a partir da mineralização de resíduos orgânicos aplicados ao solo. Doutoramento em Engenharia Agronómica, Instituto Superior de Agronomia-UTL, Lisboa
- CUNHA QUEDA, A.C.F. (1999) Dinâmica do azoto durante a compostagem de materiais biológicos putrescíveis. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agro-Industrial. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. 257 pp.
- CUNHA QUEDA, A.C. VALLINI, G., AGNOLUCCI, M., COELHO, C.A., CAMPOS, L., SOUSA, R.B. (2002) Microbiological and chemical characterisation of composts at different levels of maturity, with evaluation of phytotoxicity and enzymatic activities. In: *Microbiology of Composting*, Ed. Insam, H., Riddech, N., Klammer, S., Springer-Verlag, Berlin. pp: 345-355 (cit. Gonçalves, 2002).
- CUNHA QUEDA, A.C.F. (2006) Compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis (ROB's) para uso compatível em agricultura biológica (AB). *Vida Rural*, 1719 (54), julho/agosto: 37-40.

CUNHA QUEDA, A.C.F., MORAIS, M.-C., RIBEIRO, H.M., ALMEIDA, M.H. (2010) Caracterização de compostos e de materiais orgânicos para a formulação de substratos para viveiros. *Revista de Ciências Agrárias* Vol XXXIII (1): 367-375.

DE BERTOLDI, M., VALLINI, G., PERA., A. (1982a). Ecologia micróbica del compostaggio. *Ann. Microbiol.*, **32**: 121-135.

DE BERTOLDI, M., VALLINI, G., PERA., A. (1983). The biology of composting: a review. *Waste Manage. Res.*, **1**: 157-176.

DE BERTOLDI, M., VALLINI, G., PERA., A., ZUCCONI, F. (1985). Technological aspects of composting including modelling and microbiology. In: *Composting of agricultural and other wastes. Comissiono f European Communities*. Oxford, 19-20 March. Ed. Gasser, J.K.R., Elsevier Applied Science Publishers, Essex, 1985: 27-38.

DE BERTOLDI, M., ZUCCONI, F. (1980). Microbiologia della trasformazione dei rifiuti solidi urbani in compost e loro utilizzazione in agricoltura. *Ing. Ambient.*, **9**(3): 209-216.

DG ENV. A.2. (2001) *Biological Treatment of Biowaste*, 2nd Draft of biological treatment – Working document. Directorate-General Environment, Directorate A – Sustainable Development and Policy Support, ENV. A.2 – Sustainable Resources European Comission, Brussels. 22 pp. Disponível em [http://europa.eu.int/comm/environment/waste/facts\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/waste/facts_en.htm). Consultado em 5 de maio de 2016.

Diretiva 1999/31/CE do Conselho de 26 de Abril de 1999 relativa à deposição de resíduos em aterro. Disponível em: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:182:0001:0019:PT:PDF>. Consultado em 7 de março de 2016.

Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008, relativa aos resíduos e que revoga certas diretivas. Disponível em: <http://erolex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:PT:PDF>. Consultado em 15 de abril de 2016.

EPSTEIN, E. (2011) *Industrial composting: environmental engineering and facilities management*. CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC. USA. 318 pp.

FAUTINO, A.C. D. (2006) Compostagem de resíduos putrescíveis. Relatório do trabalho de Fim de Curso de Engenharia Agro-Industrial. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa.

FERREIRA, J.C., STRECHT, A., RIBEIRO, J.R., SOEIRO, A., COTRIM, G. (2002). Manual de Agricultura Biológica. Fertilização e protecção de plantas para uma agricultura sustentável. Agrobio (ed.), Lisboa, Portugal. 435 pp.

FINSTEIN, M.S. (1980). Composting microbial ecosystem: implication for design and control. *BioCycle*, **21**: 25-27.

FROST, D.I., TOTH, B.L., HOITINK, H.A.J. (1992). Compost stability. *BioCycle*, **32**(11): 62-66.

GODDEN, B., PENNINCKX, M.J., CASTILLE, C. (1986). On the use of biological and chemical indexes for determining agricultural compost maturity: extension to the field scale. *Agric. Wastes*, **15**: 169-178.

GOLUEKE, C.G. (1981a). Composting: a review of rationale, principles and public health. In: *Composting: theory and practice for cuty, industry and farm*. Ed. Compost Science Staff, J.G. Press, Emmaus: 19-25. (cit. Cook et al., 1994).

GOLUEKE, C.G. (1982). Selection and adaptation of compost system. **In: Composting**. Ed. The Staff of Compost Science/Land Utilization, J.G. Press, Emmaus. (cit. De Bertoldi et al., 1982a).

GONÇALVES, M.J.S. (1999) *Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos urbanos. Sua valorização para fins agrícolas pelo método de compostagem*. Trabalho de doutoramento em Engenharia Agronómica, ISA, Lisboa. 412 pp.

GONÇALVES, M. (2005). *Gestão de Resíduos Orgânicos*. SPI – Sociedade Portuguesa de Inovação, Porto

GRUNDY, A.C., GREEN, J.M., LENNARTSSON, M. (1998). The effect of temperature on the viability of weed seeds in compost. *Compost Sci. Util.*, **6**(3): 26-33.

HAMODA, M.F., ABU QDAIS, H.A., NEWHAM, J. (1998) Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. *Resources, conservation and Recycling* **23**: 209-223

HAUG, R.T. (1979) *Engineering principles of sludge composting*. J. Water Poll. Contr. Fed., 51, p. 2189-2195. (cit. Gonçalves. 1999).

HAUG, R.T. (1980) *Compost engineering: principles and practice*. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster (cit. Cunha Queda, 1999).

HE, X.T., TRAINA, S.J., LOGAN, T.J. (1992) Chemical properties of municipal solid waste compost. *J. Environ. Qual.*, 21: 318-329 (cit. Cunha Queda, 1999).

HIRAI, M., CHANYASAK, V., KUBOTA, H. (1983). A standard measurement for compost maturity. *BioCycle*, **24**: 54-56.

IANNOTTI, D.A., GREBUS, M.E., TOTH, B.L., MADDEN, L.V., HOITINK, H.A.J. (1993). A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Sci. Util.*, **1**(3): 52-65.

JIMÉNEZ, E.I., PÉREZ GARCÍA, V. (1989). Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biol. Wastes*, **27**: 115-142.

LAGA – MERKBLATT M 10 (1995) Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost. Müll-Handbuch Lfg. 5/95, Kennziffer 6856, Ed. Erich Schmidt Verlag, Berlin (cit. Cunha Queda, 1999).

Lipor (2016). Economia circular: Conceito e Benefício. Disponível em: <http://www.lipor.pt/pt/residuos-conceitos-fundamentais/economia-circular-conceito-e-beneficio/>

MARTINHO, M.G.M., GONÇALVES, M.G.P. (2000) Valorização e tratamento de resíduos. **In: Gestão de Resíduos**. Universidade Aberta, Lisboa. 125-184 pp. (cit. Teodoro, 2006).

MERKEL, J.A. (1981) Composting **In: Managing livestock wastes**. Ed. por AVI.: 306-322 (cit. Cunha Queda, 2003).

MORAIS, M.C.F. (2003) *Evolução da estabilidade e da maturação durante o armazenamento de produtos obtidos a partir da compostagem da fracção orgânica de resíduos sólidos urbanos*. Relatório de trabalho de fim de curso em Engenharia Agro-Industrial, ISA, Lisboa. 77 pp.

- MOREL, J.L., COLIN, F., GERMON, J.C., GODIN, P., JUSTE, C. (1985). Methods for the evaluation of maturity of municipal refuse compost. *In: Composting of agricultural and other wastes*. Ed. Gasser, J.K.R, Elsevier, New York: 56-72.
- MUSTIN, M. (1987). Le compost Gestion de la matière organique. Édition François Dubus, 954 pp (cit. Santos, 2001, cit. Cunha Queda, 1999).
- NANNIPIERI, P., GREGO, S., CECCANTI, B. (1990). Ecological significance of the biological activity in soil. *In: Soil biochemistry*, Vol. 6. Ed. Boolag, J.m. e Stotzky, G., Marcel Dekker, New York: 293-355.
- NETO, J.T.P., STENTIFORD, E.I., MARA, D.D. (1987). Comparative survival of pathogenic indicators in windrow and static pile. *In: Compost: production, quality and use*. Ed. De Bertoldi, M., Ferrenti, M.P., L'Hermite, P., Zucconi, F., Elsevier Applied Science Publishers Ltd., Essex: 276-295 cit. Cunha Queda, 1999).
- OLIVEIRA, R. (2010). Testes de Maturação Aplicados a Matrizes Bioestabilizadas. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa
- Parlamento Europeu (2016). Política ambiental: princípios gerais e quadro de base. Disponível em: [http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/pt/displayFtu.html?ftuld=FTU\\_5.4.1.html](http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/pt/displayFtu.html?ftuld=FTU_5.4.1.html)
- PIEIDADE, M., AGUIAR, P. (2010) *Opções de Gestão de Resíduos Urbanos*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR, I.P.), Lisboa, 211 pp.
- RAVIV, M., TARRE, S., GELER, Z., SHELEF, G. (1987). Changes in some physical and chemical properties of fibrous solids from cow manure and digested cow manure during composting. *Biol. Wastes*, 19: 309-318
- REGAN, R.W., JERIS, J.S. (1970). A review of the decomposition of cellulose and refuse. *Compost Sci.*, 11: 17-20. (cit. Jiménez e Pérez García, 1989).
- RICHARD, D., ZIMMERMAN, R. (1995). Respiration rate – reheating potential: a comparison of measures of compost stability. *Compost Sci. Util.*, 3(2): 74-79.
- RUSSO, M.A.T. (2003) Tratamento de Resíduos Sólidos. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. 196 pp. Disponível em [http://www1.ci.uc.pt/mhidro/edicoes\\_antigas/Tratamentos\\_Residuos\\_Solidos.pdf](http://www1.ci.uc.pt/mhidro/edicoes_antigas/Tratamentos_Residuos_Solidos.pdf). Consultado em 26 de junho de 2016.
- RUSSO, M.A.T. (2004). Introdução à compostagem de resíduos sólidos. Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Superior Politécnico de Viana do Castelo.
- SPEIR, T.W., ROSS, D.F. (1978). Soil phosphatases and sulfatases. *In: Soil enzymes*. Academic Press, New York: 198-235. (cit. Herrmann e Shann, 1993).
- STICKELBERGER, D. (1975). Survey of cuty refuse composting. *In: Organic matter as fertilizers*. Swedish International Development Authority, FAO, Soils Bull., 27, Rome: 185-209. (cit. Jiménez e Pérez García, 1989).
- TEODORO, A.I. (2006). Obtenção de Produtos Compostados de Elevada Qualidade para Utilização em Agricultura Biológica. Relatório de trabalho de fim de curso de engenharia do ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa
- VALLINI, G. (1995a). Compost. *In: Dizionario dell'ambiente*, ed. Gamba, G., Martignetti, G., ISEDI, UTET Libreria, Torino: 173-174.

VALLINI, G. (1995b). Il Compostaggio. In: La protezione dell'ambiente in Italia. Ed. Bertini, I., Cipollini, R., Tundo, P. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Società Chimica Italiana e Conzorcio Interuniversitario Chimica per l'Ambiente. Bologna: 83-134.

ZUCCONI, F., DE BERTOLDI, M. (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. **In:** *Compost: production, quality and use*. Ed. De Bertoldi, M., Ferranti, M.P., L'Hermite, P., Zucconi, F., Elsevier Applied Science Publishers Ltd., Essex: 30-50 (cit. Cunha Queda, 1999; Morais, 2

ANEXOS

---

## **Anexo I**

Dados das temperaturas medidas na pilha MB

---



## Temperaturas Diárias das Pilhas - Mistura Base

Dia		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Esquerda	Topo	13,4	23,1	30,6	32,5	30,6	29,1	27,3	24,4	19,3	22,7	20	24,5	24	21,2	23,3	19,3
	Meio	13,2	23,9	30	31,2	28,4	28,5	26,3	22,2	21,2	21,8	19,6	24,8	24,3	21	24,5	20,5
	Base	13,3	17,7	23,8	22,1	21,1	21,4	22,6	20,4	19,7	20,4	19,6	22,8	22,6	20,2	20,2	21,9
Centro	Topo	13,6	26,6	36,2	40,2	30,7	30,4	33,2	33,9	33,4	32,8	32,6	31,3	29,5	28,6	26,7	21,3
	Meio	13,9	27,8	35,4	40,7	29,5	29,6	30,7	30,8	30,8	31,7	31,1	30,6	32	31,1	31	20,2
	Base	14,1	20,8	27,2	31,4	24,5	24,3	27,7	27,9	29	30,1	28,7	28,4	27,5	26,4	24,2	22
Direita	Topo	13,1	21,9	27,2	28,4	26,1	27,1	28,9	27,9	27,6	25,2	25,8	26,7	27,3	27,4	25,1	22,3
	Meio	13,1	18	27,5	26,3	25	26,6	27,8	27,2	27,5	24,5	27,5	26,6	27,8	28,8	27,6	20,8
	Base	13,1	18	23,1	22	19,3	21,6	24,9	23,5	23,6	22	23,3	24,1	21,9	21,2	20,7	19,9
T <sub>amb</sub>		13,9	13,3	14,8	14,5	15,5	14,5	13,6	13,7	13,1	12,4	13,8	14,3	16	17	14,2	16,9

Dia		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	29	30	31	32	33	34
Esquerda	Topo	21,8	22,7	26	18,7	20,7	19,8	19,5	20,4	21,4	21,8	22,8	23,8	24,3	24,8	36,3	44,1
	Meio	22,8	23,1	27,6	20	20,5	22,1	20,6	22,1	22,1	22	24,2	25,3	24,4	26,2	35,6	40,1
	Base	19	19,4	23,7	19,2	19,1	21,2	19,5	20,8	20,1	20	22,4	23	23,7	25,3	31,7	35
Centro	Topo	32,6	32,1	32,5	32,8	31,2	31,3	31,2	30,6	31,8	31,5	30,1	29,9	29,5	27,4	43,4	52,3
	Meio	31,5	32,3	33,5	32,4	32,2	31,1	29,9	32,2	31,4	31,1	31,5	31,2	30,9	29,8	42,8	54,7
	Base	24,8	28,4	28,8	29,3	30,2	29,5	27,5	29,3	28,6	29,1	30,6	29,2	29,3	28,6	39,2	51,5
Direita	Topo	24,4	22	26,5	21,8	22	20,2	20,9	20,4	19,1	20,3	22,1	24,3	24,3	21,7	40,2	49,3
	Meio	23,2	20,9	25,9	21,2	21,1	19,1	20,8	20,7	19,1	20,4	22,7	24,4	24,4	22	39,3	45,1
	Base	19,9	19,8	20,9	20	20,1	18,9	19,8	20,3	19	19,6	22,2	23,1	23,5	21,7	35,1	39
T <sub>amb</sub>		15,8	14	13,8	15,3	13,4	13,5	14,1	15	16	16,2	17,8	16	15,9	12,9	14,8	17,6

Dia		35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	50	51
Esquerda	Topo	49,1	47,3	41,3	37,3	33,4	30,2	26	25	19,1	20,3	19,1	19,7	19,3	18,2	20,4
	Meio	50,2	48,9	41,7	40	36,8	32,5	29	26,3	22,4	21,7	21,2	21	20,7	20,2	21,4
	Base	44	43,8	34,6	35,2	33,5	28,5	26,2	23,8	22	21,5	21	19,9	20,4	20,6	20,3
Centro	Topo	53,2	50,8	44,5	44,6	42,3	36,7	29,7	29	23,9	20,7	20,6	21	20,8	19,1	20,6
	Meio	55,8	56	51,5	49,6	47,8	41,6	33,4	27,2	24,7	22	21,7	21,4	21,8	20,9	21
	Base	51,9	51	47,8	44,4	42	37,8	32,9	25,1	24,2	22,4	21,7	20,4	21,7	21,1	20,3
Direita	Topo	49,5	48	42,3	37,4	35,1	31,8	31,7	27,8	20,9	19,7	20,1	20,9	19,9	18,8	20
	Meio	46,8	49,2	44,2	41	38,4	33,3	27,2	25,4	22,3	21,4	21,5	21,6	21	20,7	20,9
	Base	35,6	41,4	36,1	36,4	33,2	30,2	28,7	23,3	22,7	21,5	20,9	20,4	20,4	19,8	20,8
T <sub>amb</sub>		15,8	15,4	15,2	16,6	16,6	13,8	17,6	15,1	13,8	14,5	16,2	17,4	16,9	16,5	19,6

Dia		52	53	54	58	59	60	61	64	65	66	67	68	71	72	73	74	75
<b>Esquerda</b>	<b>Topo</b>	20,2	19,2	20,6	19,2	19	19,2	19,5	23,1	24,4	19,7	21,7	18,9	18,5	19,9	18,7	19	19,3
	<b>Meio</b>	21,1	20,9	21	20,6	20,5	20,2	20,4	23,4	23,7	20,7	23,2	20,4	20,2	19,8	19,6	19,2	19,1
	<b>Base</b>	20,2	20,9	20	20,6	20,3	20,2	20,2	23,1	22,1	20,5	21,9	20,4	20,1	19,7	19,6	19,1	18,7
<b>Centro</b>	<b>Topo</b>	19,7	20,9	20,2	19,6	19,5	19,5	19,8	23,5	24,6	19,1	24,7	21,6	20,8	20,8	19	19	20
	<b>Meio</b>	20,4	21,1	20,6	20	20,1	20,3	20,6	23,9	25,2	19,3	25,9	23	21,3	21,4	20,3	20,2	20,6
	<b>Base</b>	20,2	20,6	20,1	20,1	20,3	20,2	20,1	23,1	23,6	19,7	25,1	22,9	21	21,2	20,9	20,6	20,4
<b>Direita</b>	<b>Topo</b>	19,6	19,6	20,2	19,6	19,5	19,4	19,5	23,2	24,4	19,6	24,7	22,3	20,7	20,6	19,9	20,2	19,9
	<b>Meio</b>	20,5	20,6	20,6	20,8	20,6	20,1	20	23,4	24,7	20,8	25	23,1	20,9	21,2	20,7	20,5	20,3
	<b>Base</b>	20,6	20,4	20,5	20,6	20,5	20	19,9	23,3	23	20,8	23,5	22,7	20,6	20,9	20,6	20,2	19,6
<b>T<sub>amb</sub></b>		18,1	17,4	18,6	16,6	16	16,2	17,1	26	31,4	18,4	16,4	15,3	14,8	19,8	15,9	19,2	19,9

Dia		78	79	80	81	82	85	86	87	88	89	92	93	94	95	96	99
<b>Esquerda</b>	<b>Topo</b>	21,3	20,8	20,4	19,8	20,5	20,6	19,5	20	19,8	20,2	19,1	21,2	20,6	21,5	20,8	21
	<b>Meio</b>	20,3	20,4	20,5	20,2	21,3	21,3	20,2	20,5	20,3	20,5	19,8	21,4	21,1	22,2	21,8	22
	<b>Base</b>	19,5	19,8	20	19,8	20,6	20,6	20	20,7	20,5	20,5	20	20,7	21	21,8	20,9	20,9
<b>Centro</b>	<b>Topo</b>	21,5	21,1	21,2	20,1	20,6	20,5	19,9	20,2	20	20,2	19,3	21,1	20,7	21,6	21,3	21,2
	<b>Meio</b>	21,4	21,3	21,1	20,8	21,7	21,7	20,8	21,3	20,4	20,9	20,5	21,4	21,2	22,2	22	22,4
	<b>Base</b>	20,3	20,9	20,9	20,7	21,1	20,8	20,5	21,6	21	20,8	21,1	20,7	21,4	21,9	21,4	21,3
<b>Direita</b>	<b>Topo</b>	21,1	21	20,5	19,9	21,1	20,6	19,7	20,7	20,3	20,4	19,7	21,1	20,8	21,7	20,9	21,1
	<b>Meio</b>	20,8	21,2	21,1	21	21,8	21	20,6	21,5	20,8	21	21	22	21,9	22,4	21,4	21,8
	<b>Base</b>	19,8	20,2	20,4	20,5	21,3	20,8	20,4	21,2	20,6	20,8	21,2	21,1	21,7	22	21,1	20,8
<b>T<sub>amb</sub></b>		26,3	24,1	22,9	22,3	20,1	22,5	18,4	19,8	19,7	19,8	19,9	25,1	24,8	25,1	20,5	23,6

Dia		100	101	102	108	109	110	113	114	115	116	117	120	121	122	123
Esquerda	Topo	21,8	22,7	22,2	20,5	20,6	20,9	22,8	22,7	22,5	22,2	22	28,5	24,8	21,5	21,4
	Meio	23,4	23,6	23,3	21,6	21,8	21,8	23,2	23	22,7	22,5	22,2	26	24,5	22,7	22,5
	Base	22	22	21,6	20,8	20,8	21,1	22,7	22,5	22,4	22,2	21,8	25,6	25,2	21,4	21,3
Centro	Topo	22,2	23,4	23,1	21	21	21,2	23	22,8	22,9	22,4	22,1	28,9	24,9	21,6	21,5
	Meio	24,5	24,8	24,2	22,7	22,8	22,9	23,7	23,3	22,9	22,8	22,5	25,8	24,7	23,1	22,8
	Base	22,6	22,7	22,3	21,6	21,7	21,4	22,8	22,6	22,2	22,1	21,9	25,8	25,5	21,6	21,4
Direita	Topo	21,8	22,7	22	20,7	20,7	20,9	22,7	22,6	22,6	22,1	21,8	28,7	24,8	21,5	21,4
	Meio	23,7	23,7	23,3	21,7	21,8	21,9	23,3	23	22,6	22,6	22,3	26,1	24,8	22,6	22,4
	Base	22,2	22,4	21,7	21,3	21,4	21,5	22,6	22,4	22,3	22	21,8	26	25,7	21,4	21,4
T <sub>amb</sub>		29,4	30,2	24,7	19,7	20,6	21,5	31,4	29,6	30	25,1	23,3	32,7	24,7	24,5	24,6

Dia		124	127	128	129	130	131	134	136	137	138	141	142	143	144	145	148
Esquerda	Topo	21,2	23,8	24	23,9	24,2	24,3	23,7	23,8	24,1	24,3	27,8	26	25,8	25,6	25,7	29,4
	Meio	22,2	24	24,2	24,2	24,4	24,4	24	24	24,3	24,5	25,7	25,3	24,4	24,2	24,4	27
	Base	21	23,9	24	24	24,2	24,2	23,9	24,5	24,7	24,7	25,3	24,4	24,3	24,1	24,5	26,3
Centro	Topo	21,4	24	24	24	24,3	24,5	23,9	24	24	24,1	27,8	26,3	26,1	25,9	26	29,3
	Meio	22,5	24,1	24,2	23,9	24,3	24,5	23,6	23,4	23,5	23,5	26,1	25	24,5	24,6	24,8	26,5
	Base	21,4	23,8	23,9	23,6	23,7	23,7	23,3	23,6	23,8	23,9	25,5	24,2	24	24,8	24,8	25,8
Direita	Topo	21,3	23,8	23,9	23,8	24	24	23,6	24	24,2	24,3	26,6	26,1	25,6	25,3	25,5	28,6
	Meio	22,3	23,9	24	24	24,1	24,3	23,7	24	24,3	24,4	25,7	24,5	24,5	24,4	24,7	26,5
	Base	21,3	23,7	23,8	23,8	23,9	24	23,7	24,5	24,6	24,7	25,6	24,6	24,8	24,9	25,2	26,2
T <sub>amb</sub>		23,3	27,1	28,4	25,4	29,5	30	24,3	27,1	30,2	30,2	32,7	30,1	28	26,8	28	32,6

Dia		149	150
Esquerda	Topo	29,8	28,7
	Meio	27	26
	Base	26,6	25,6
Centro	Topo	29,4	27,9
	Meio	27,3	26,5
	Base	26,1	25,9
Direita	Topo	28,7	29,2
	Meio	27	26,2
	Base	26,6	26,1
T <sub>amb</sub>		31,6	30,7

## **Anexo II**

Dados das temperaturas medidas na pilha MBE

---

### Temperaturas Diárias das Pilhas - Mistura Base + Estrume

Dia		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Esquerda	Topo	13,8	21,2	23,5	32,2	30,6	30	27,5	31,6	29,9	25,5	30,1	26,6	26	26,6	25,6	19
	Meio	13,9	23,3	28,2	34,4	30,9	31	29	31,9	33,2	27	31,3	26,2	29,5	30,2	28,5	21,3
	Base	14	20,5	20,3	28,3	26	24,1	25	23,6	25,9	23,4	24,8	22,9	25,7	25,8	24,8	20,1
Centro	Topo	30	22,1	30,9	38,1	30	34,6	36,4	38,9	35,8	38,1	37	36,1	31,6	28,9	24,2	20,4
	Meio	33,2	24,9	33,9	39,1	33,2	35,3	36,1	37	39,6	39,1	38,1	37,4	35,7	34,5	32,6	20,9
	Base	28,2	22,6	28,2	32,6	28,2	32,1	31,4	32,8	34,2	35,5	28,6	28,3	30,2	28,8	26,8	23,7
Direita	Topo	27,6	21	28,3	28,3	27,6	26,7	25	25,3	28,5	26	25,9	25,8	25,2	23,8	24,3	24,5
	Meio	26	23	28,4	30,6	26	25,7	23	23,7	28,3	24,9	25,2	24,2	26,6	25,2	24,6	21,6
	Base	19,6	19,5	22,6	22,8	19,6	21,2	18,8	19,4	23	19,1	20,3	19	22,2	20,4	18,8	21,1
T <sub>amb</sub>		13,9	13,3	14,8	14,5	15,5	14,5	13,6	13,7	13,1	12,4	13,8	14,3	16	17	14,2	16,9

Dia		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	29	30	31	32	33	34
<b>Esquerda</b>	<b>Topo</b>	22,7	17,9	24	19,4	20,3	19,1	19	20	18,7	19,5	21,4	20,8	20,9	20,5	25,2	43,3
	<b>Meio</b>	23,9	20,5	24,7	20,8	21,6	22	21,8	21,4	20,6	20,7	22,3	23,2	23	22,4	30,2	44,5
	<b>Base</b>	19,8	19,2	21,7	19,5	20,9	21,1	20,8	20,7	20,2	20,5	20,8	22,4	22	21,7	29,5	39,6
<b>Centro</b>	<b>Topo</b>	29,4	32,8	32,5	31,6	31,4	29,7	29,3	29,2	27,6	28,1	28,1	28,6	28,1	26,6	28,9	52,8
	<b>Meio</b>	29,6	32,7	30,4	31,3	31,9	30,6	30,1	29,9	29,3	30	29,6	29,3	29,2	28,7	33,7	52,5
	<b>Base</b>	24,9	28,1	25,7	27,5	29,3	29	29,2	28,3	26,9	27,2	28,8	28,2	28,2	27,8	30,4	46,9
<b>Direita</b>	<b>Topo</b>	26,6	24,8	26,9	26,5	25,3	23,1	22,7	23,1	23,8	24	24,2	24,9	24,6	24,9	27,4	42,9
	<b>Meio</b>	27,2	23,7	25,2	25,7	25,1	22,6	22,4	23,1	24,3	24,6	23,8	24,6	24,5	24,9	29,4	41,5
	<b>Base</b>	22,5	21,9	21,9	23	23,7	21,6	21	21,8	22,8	23,4	23,2	24,1	23	23,6	27,3	35,2
<b>T<sub>amb</sub></b>		15,8	14	13,8	15,3	13,4	13,5	14,1	15	16	16,2	17,8	16	15,9	12,9	14,8	17,6

Dia		35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	50	51	52
<b>Esquerda</b>	<b>Topo</b>	51,7	48,5	44,7	36,5	33,3	31	25,1	24,8	19,1	18,7	18,6	19,8	19,4	19	19,5	19,5
	<b>Meio</b>	50,3	54,4	51	44	42,9	35,5	28,3	27,5	23	20,8	20	20,4	20,3	20,1	20,2	20,3
	<b>Base</b>	41,8	46,7	43,7	38,7	40,2	31	27,5	26,1	20,9	21,2	20,6	19,5	20,6	18,8	20,4	20,2
<b>Centro</b>	<b>Topo</b>	55,2	46,9	47,2	44	46,3	37,5	27,5	25,3	22,3	20,6	20,1	21,1	20,6	18,5	19,8	19,6
	<b>Meio</b>	55,8	54,9	53,2	51,7	50,4	43,6	35	29,4	24,8	22,4	21,3	21,6	21,9	20,3	20,6	20,3
	<b>Base</b>	49,7	49,8	47,4	45,9	46	38,7	32,9	26,8	24,5	22,3	21,4	20,9	21,6	19,4	20,3	20
<b>Direita</b>	<b>Topo</b>	46,4	48,9	43,4	38,7	36,1	33,1	27,2	25,2	18,7	20	19,8	19,7	19,8	18,1	20,1	19,7
	<b>Meio</b>	42,3	44,5	39,7	41,7	40	35,9	29,4	24,7	21,9	21,1	20,7	20,7	20,6	20,4	20,8	20,7
	<b>Base</b>	33,3	33,8	29,6	33,1	31,9	31,4	26,2	23,7	21,7	20,3	20,1	20,1	20,2	19,7	19,9	20,4
<b>T<sub>amb</sub></b>		15,8	15,4	15,2	16,6	16,6	13,8	17,6	15,1	13,8	14,5	16,2	17,4	16,9	16,5	19,6	18,1



Dia		53	54	58	59	60	61	64	65	66	67	68	71	72	73	74	75
<b>Esquerda</b>	<b>Topo</b>	19,4	19,8	19	18,8	19,1	19,8	22,1	23,1	19,5	22,4	20,9	20,7	20	19	19,6	19,1
	<b>Meio</b>	20,3	20,5	20,4	19,6	20,5	21	22,6	23,3	20,4	24	22,3	21,9	20,6	20	20,1	20,1
	<b>Base</b>	20	20,3	20,3	19,4	20,3	20,8	22,2	22,6	20,5	23,9	22	21	20,5	20,1	20,5	19,8
<b>Centro</b>	<b>Topo</b>	19,5	20,3	19	19	19,8	20,3	22,7	23,4	19,2	24	23	21,1	21,1	19,9	20	19,6
	<b>Meio</b>	20,2	20,5	20	20,1	20,8	21	23,1	23,6	20	25,3	23,8	21,7	21,7	21,2	20,7	20,3
	<b>Base</b>	20,1	20,3	20,1	20	20,6	20,7	22,7	22,7	20,1	24,7	23,4	21,4	21,6	21,3	20,8	20,2
<b>Direita</b>	<b>Topo</b>	19,9	20,4	19,9	18,9	19,7	20	22,9	22,9	20,2	21,5	21,5	20,8	20	19,4	19,3	19,1
	<b>Meio</b>	20,7	20,9	20,4	19,4	20,4	20,6	23	23,1	20,8	22,6	21,8	20,9	20,3	20,1	19,6	19,2
	<b>Base</b>	20	20,1	20,3	19,2	20,2	20,3	22,7	22,2	20,4	22,1	21,4	20,7	20	19,8	19,5	18,8
<b>T<sub>amb</sub></b>		17,4	18,6	16,6	16	16,2	17,1	26	31,4	18,4	16,4	15,3	14,8	19,8	15,9	19,2	19,9

Dia		78	79	80	81	82	85	86	87	88	89	92	93	94	95	96	99
<b>Esquerda</b>	<b>Topo</b>	20,8	20,9	20,7	20,5	20,8	20,5	20	20,6	19,7	20	20	21,2	21,2	21,7	21	21,2
	<b>Meio</b>	20,5	20,7	20,9	20,8	21,2	21	20,5	21,1	20,2	20,3	20,5	21,7	21,8	22,3	21,5	22,1
	<b>Base</b>	19,8	20,3	20,3	20,5	21	20,7	20,4	21,3	21	20,8	20,8	20,8	21,3	21,1	20,9	21,1
<b>Centro</b>	<b>Topo</b>	21	21,1	20,8	20,4	21,3	20,6	20,4	20,9	20,5	20,4	20,2	21,3	21,1	21,9	21	21,5
	<b>Meio</b>	20,8	21,2	21,1	21	22,1	21,4	21,3	22,1	21,3	21,5	21,6	21,9	22	22,9	21,9	22,7
	<b>Base</b>	20,4	20,5	20,8	21,3	21,7	20,9	20,9	22,2	21,7	21,4	21,7	21,2	21,8	21,4	20,9	21
<b>Direita</b>	<b>Topo</b>	20,6	20,3	20,4	19,3	20,7	20,4	20,4	20,7	20	20	19,6	21,2	20,4	21,5	21	21,4
	<b>Meio</b>	20,4	20,1	20,5	20,4	21,3	20,8	20,7	21,3	20,4	20,6	21,1	21,7	21,6	22,6	21,8	22
	<b>Base</b>	19,8	19,7	20,3	20,2	21	20,6	20,5	21,2	20,5	20,6	20,6	21,4	21,3	22,3	21	21,3
<b>T<sub>amb</sub></b>		26,3	24,1	22,9	22,3	20,1	22,5	18,4	19,8	19,7	19,8	19,9	25,1	24,8	25,1	20,5	23,6

Dia		100	101	102	108	109	110	113	114	115	116	117	120	121	122	123	124
Esquerda	Topo	21,6	22,4	22,1	20,4	20,5	20,7	23	22,8	22,6	22,3	22,2	27,2	24,3	21,8	21,5	21,3
	Meio	22,5	22,9	22,6	21,1	21,3	21,6	23,3	23	22,9	22,7	22,6	25,9	24,9	22,7	22,6	22
	Base	21,6	21,9	21,7	20,7	20,7	20,8	22,7	22,5	22,4	21,9	21,8	25,8	25,8	21,6	21,5	21,3
Centro	Topo	22	22,9	22,6	20,8	20,9	21,2	23,2	23	22,8	22,6	22,5	28,2	24,4	22,2	21,8	21,7
	Meio	23,7	23,8	23,4	21,8	22,4	22,3	23,4	23,2	23	22,9	22,7	25,8	24,9	23,6	23,2	22,8
	Base	21,9	22,3	22	21	21,3	21,6	22,9	22,7	22,6	22,1	21,9	25,7	25,5	21,8	21,6	21,5
Direita	Topo	21,7	22,8	22,3	20,5	20,7	20,7	23,1	22,9	22,6	22,4	22,3	27,5	24,5	21,9	21,7	21,6
	Meio	22,6	22,7	22,4	21,4	21,5	21,8	23,2	23,1	22,9	22,8	22,5	25,6	25,1	22,9	22,7	22,4
	Base	21,7	22,1	22	20,8	20,9	20,9	22,6	22,4	22,2	22	21,8	25,5	25,6	21,6	21,4	21,4
T <sub>amb</sub>		29,4	30,2	24,7	19,7	20,6	21,5	31,4	29,6	30	25,1	23,3	32,7	24,7	24,5	24,6	23,3

Dia		127	128	129	130	131	134	135	136	137	138	141	142	143	144	145	148
Esquerda	Topo	24	24,2	24,2	24,4	24,4	24,1	24	24,3	24,5	24,7	27	26	25,9	25,8	25,8	29
	Meio	24,3	24,5	24,6	24,8	24,9	24,5	24,4	24,7	24,9	25	25,9	25,7	24,9	24,7	24,7	26,7
	Base	24,2	24,4	24,4	24,8	24,9	24,4	24,3	24,7	25	25,1	25,7	25	24,8	24,6	24,8	26,4
Centro	Topo	24,3	24,5	24,4	24,6	24,7	23,7	23,2	23,6	23,9	24	27,8	26,4	26,4	26,2	26,6	28,7
	Meio	24,5	24,6	24,2	24,4	24,7	24	23,3	23,8	24	24,2	25,7	25,8	24,6	24,4	24,6	26,8
	Base	24,2	24,3	24	24,3	24,4	23,8	23,6	24,2	24,3	24,4	25,4	25,2	25,1	24,8	24,9	26
Direita	Topo	24,1	24,3	24,1	24,2	24,3	23,8	23,7	24,2	24,2	24,3	26,6	26,1	24,7	24,3	24,4	28,3
	Meio	24,3	24,5	24,2	24,5	24,5	24,2	24	24,3	24,6	24,8	25,7	25,5	24,7	24,6	24,7	26,8
	Base	24,2	24,3	24,3	24,4	24,6	24,2	24	24,5	24,9	25	25,5	25,1	25	24,8	24,9	26,4
T <sub>amb</sub>		27,1	28,4	25,4	29,5	30	24,3	23,7	27,1	30,2	30,2	32,7	30,1	28	26,8	28	32,6

Dia		149	150
Esquerda	Topo	27,9	27,9
	Meio	26,7	26,1
	Base	26,5	26
Centro	Topo	27,9	28,1
	Meio	26,5	26,1
	Base	26,3	26,1
Direita	Topo	27,7	27,6
	Meio	26,8	26,1
	Base	26,3	25,9
T <sub>amb</sub>		31,6	30,7

### **Anexo III**

#### **Interação entre parâmetros Físico-Químicos**

---

Tabela 15 - Interação entre os parâmetros físico-químicos nas pilhas MB E MBE

		T0	T2	T3	T4	T5	T7	T8	T10
Umidade (%)	MB	74,37 abc*	74,43 abc	75,87 c	70,08 abcd	67,47 ad	65,34 df	57,08 eg	49,20 g
	MBE	74,23 bc	72,72 abcd	70,52 abcd	59,32 ef	67,63 abd	55,73 eg	57,53 ef	52,13 ge
MO (% m.s.)	MB	86,79 a	80,09 ab	84,64 a	81,17 ab	86,59 a	77,91 ab	80,51 ab	71,11 bd
	MBE	78,46 ab	79,73 ab	48,73 c	39,16 c	66,35 d	42,59 c	42,20 c	76,60 abd
pH	MB	5,90 a	7,99 cf	7,56 ed	7,97 cf	6,33 b	8,92 g	7,23 e	6,48 b
	MBE	6,35 b	7,67 dc	7,47 ed	7,97 cf	6,33 b	8,14 f	7,33 de	5,87 a
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	MB	0,37 ab	0,37 ab	0,34 ab	0,33 ab	0,85 c	0,56 de	0,61 d	1,28 g
	MBE	0,31 ab	0,27 ab	0,26 a	0,23 a	0,66 d	0,43 fe	0,43 fe	1,011 c
Carbono Orgânico Total (% m.s.)	MB	38,56 ace	42,99 e	38,03 c	32,58 ace	37,28 ace	36,77 aec	24,07 bdf	39,56 ce
	MBE	30,80 abg	25,47 abc	28,95 bdfg	28,44 bfg	26,14 bdfg	21,36 df	13,36 h	19,60 dh
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> m.s.)	MB	516,8 3 ab	574,59 bc	632,27 bce	574,74 bc	956,64 f	955,65 f	699,61 e	371,51 d
	MBE	589,1 6 bce	401,47 4 ad	438,60 ad	407,47 ad	633,18 ce	354,11 d	365,76 d	133,46 g
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> m.s.)	MB	641,1 3 af	267,25 cb	466,36 ade	780,92 fj	975,74 gh	405,90 bd	1850,70 i	883,95 gj
	MBE	439,5 8 bde	391,91 bd	292,40 bcd	615,73 aef	1125,13 h	195,89 c	1062,52 gh	1000,13 gh
N <sub>t</sub> (% m.s.)	MB	1,40 a	1,85 c	1,67 d	1,66 d	1,72 dc	2,16 e	2,10 e	2,38 f
	MBE	1,22 b	1,39 ab	1,31 ab	1,34 ab	1,37 ab	1,28 ab	1,28 ab	1,40 a
C/N	MB	27,56 a	23,41 abc	22,81 abc	19,62 cef	21,62 bcef	17,05 def	11,49 hg	16,60 dfg
	MBE	25,28 ab	18,41 cdef	22,07 bce	21,20 bcef	19,18 cdef	16,68 dfg	10,42 h	14,03 dhg
AT <sub>4</sub> (mg O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> m.s.)	MB	23,43 af	15,94 c	21,20 ad	10,40 e	24,74 f	14,09 cg	15,70 c	11,88 eg
	MBE	18,58 bh	15,07 C	16,44 bc	11,05 e	25,77 f	20,57 dh	14,27 cg	10,80 e

\*as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para  $\alpha=0,05$

## **Anexo IV**

### **Interação entre parâmetros Microbiológicos**

---

Tabela 1 - Interação entre os parâmetros microbiológicos nas pilhas MB e MBE

			T0	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T9	T10
B A C T É R I A S	27 °C	MB	8,99 abc *	9,07 bc	8,85 aceg	8,16 defg	8,66 acefg	9,07 bc	8,85 abcg	8,66 acefg	8,14 defg
		MBE	5,74 b	7,91 d	8,13 def	8,28 adefg	7,88 d	7,96 df	8,22 defg	8,56 acdefg	7,89 d
	44 °C	MB	7,97 acd	8,46 cefg	7,93 acd	7,69 ab	8,24 acde	9,03 f	9,03 f	8,84 fg	8,34 cdeg
		MBE	7,85 abd	7,85 abd	7,83 abd	7,30 b	8,14 acde	8,94 f	9,00 f	8,68 efg	7,85 abd
		MB	6,23 ab	6,23 ab	5,40 dfg	5,81 afh	5,42 dgf	6,44 b	6,37 b	6,94 e	4,90 c
		MBE	6,40 b	5,09 cdg	7,01 e	4,98 cd	5,86 ah	5,71 fh	5,81 afh	6,49 b	5,47 fgh
L E V E D U R A S	27 °C	MB	4,29 a	5,38 be	3,79 d	0,00 f	0,00 f	4,20 g	5,28 be	7,11 g	5,27 be
		MBE	4,35 a	5,17 bc	5,69 e	0,00 f	4,82 c	7,08 g	4,32 be	6,47 h	5,29 be
	44 °C	MB	5,50 ad	6,35 cf	6,08 bce	5,34 a	6,36 cf	7,01 gh	7,17 h	6,24 cef	6,62 fg
		MBE	5,98 bce	5,90 bde	6,16 bce	5,26 a	5,77 bd	6,16 bce	6,59 f	5,54 ad	6,31 cef
		MB	5,02 al	5,68 c	4,85 ab	4,12 d	5,99 f	6,69 h	7,31 i	0,00 j	6,18 f
		MBE	4,62 b	5,72 c	5,71 c	5,36 eg	5,54 cg	6,59 h	6,55 h	3,08 el	6,06 f
F U N G O S	27 °C	MB	5,50 ad	6,35 cf	6,08 bce	5,34 a	6,36 cf	7,01 gh	7,17 h	6,24 cef	6,62 fg
		MBE	5,98 bce	5,90 bde	6,16 bce	5,26 a	5,77 bd	6,16 bce	6,59 f	5,54 ad	6,31 cef
	44 °C	MB	5,02 al	5,68 c	4,85 ab	4,12 d	5,99 f	6,69 h	7,31 i	0,00 j	6,18 f
		MBE	4,62 b	5,72 c	5,71 c	5,36 eg	5,54 cg	6,59 h	6,55 h	3,08 el	6,06 f
		MB	5,50 ad	6,35 cf	6,08 bce	5,34 a	6,36 cf	7,01 gh	7,17 h	6,24 cef	6,62 fg
		MBE	5,98 bce	5,90 bde	6,16 bce	5,26 a	5,77 bd	6,16 bce	6,59 f	5,54 ad	6,31 cef

\*as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para  $\alpha=0,05$

## **Anexo V**

### **Interação entre parâmetros Enzimáticos**

---



*Tabela 1 - Interação entre os parâmetros enzimáticos nas pilhas MB e MBE*

\*as médias assinaladas com a mesma letra para cada parâmetro, não apresentam diferenças significativas entre si para

		<b>T0</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T10</b>
<b>Fosf. Ácidas (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	3,95 ac*	4,03 ac	4,06 c	3,53 d	2,46 de	2,34 de	2,04 ef
	<b>MBE</b>	3,54 b	3,64 ab	3,35 b	3,49 b	2,25 de	2,23 de	1,70 f
<b>Fosf. Alcalinas (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	3,44 ad	4,12 c	3,87 ce	3,66 ed	3,23 abf	2,88 b	2,08 g
	<b>MBE</b>	3,04 bf	3,45 ad	3,31 adf	3,46 ad	2,36 g	2,33 g	1,63 h
<b>Celulases (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	4,67 af	4,24 ac	3,89 ce	4,11 ace	5,17 f	3,12 bdg	2,15 ih
	<b>MBE</b>	3,60 bce	3,50 bde	3,46 bde	3,53 bde	2,88 dg	2,56 hg	1,51 i
<b>Proteases (10<sup>-3</sup>)</b>	<b>MB</b>	3,40 a	3,49 c	3,38 e	2,99 g	2,44 h	2,18 j	1,91 m
	<b>MBE</b>	2,99 b	3,04 d	3,14 f	3,03 d	2,23 i	2,20 l	1,57 n

α=0,05

## **Anexo VI**

### **Coeficientes de Correlação entre os parâmetros da pilha MB**

---

Tabela 1 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros da pilha MB

	Humidade	MO	pH	CE	COT	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nt	C/N	AT4
<b>Humidade</b>	1									
<b>MO</b>	0,828	1								
<b>pH</b>	ns	ns	1							
<b>CE</b>	-0,911	-0,873	ns	1						
<b>COT</b>	ns	ns	ns	ns	1					
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	ns	ns	0,757	ns	ns	1				
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	ns	ns	ns	ns	-0,886	ns	1			
<b>Nt</b>	-0,859	-0,916	ns	0,81489	ns	ns	ns	1		
<b>C/N</b>	0,787	ns	ns	ns	0,703	ns	-0,718	-0,790	1	
<b>AT4</b>	ns	0,758	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1
<b>Bact. 27</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Bact. 44</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,685	ns	ns
<b>Lev. 27</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Lev. 44</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Fung. 27</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,823	-0,745	ns
<b>Fung. 44</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,750	-0,710	ns
<b>Fosf. Ác.</b>	0,837	0,726	ns	ns	ns	ns	ns	-0,738	0,837	0,795
<b>Fosf. Alc.</b>	0,947	0,716	ns	-0,921	ns	ns	ns	-0,723	ns	ns
<b>Celulases</b>	0,749	ns	ns	-0,759	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Proteases</b>	0,966	0,783	ns	-0,824	ns	ns	ns	-0,871	0,866	ns

n.s. - não significativo

Os coeficientes de correlação com módulo >0,6694 são significativos a  $\alpha=0,1$ ; com módulo >0,7545 são significativos a  $\alpha=0,05$ ; com módulo >0,8745 são significativos a  $\alpha=0,01$

Tabela 16 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros da pilha MB

MB	Bact. 27	Bact. 44	Lev. 27	Lev. 44	Fung. 27	Fung. 44	Fosf. Ác.	Fosf. Alc.	Celulases	Proteases
Humidade										
MO										
pH										
CE										
COT										
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>										
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>										
Nt										
C/N										
AT4										
Bact. 27	1									
Bact. 44	ns	1								
Lev. 27	0,726	ns	1							
Lev. 44	ns	0,810	ns	1						
Fung. 27	ns	0,939	ns	0,795	1					
Fung. 44	ns	0,961	ns	0,810	0,954	1				
Fosf. Ác.	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1			
Fosf. Alc.	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,756	1		
Celulases	ns	ns	0,698	ns	ns	ns	ns	0,689	1	
Proteases	ns	ns	ns	ns	-0,670	-0,691	0,913	0,911	ns	1

n.s. - não significativo

Os coeficientes de correlação com módulo >0,6694 são significativos a  $\alpha=0,1$ ; com módulo >0,7545 são significativos a  $\alpha=0,05$ ; com módulo >0,8745 são significativos a  $\alpha=0,01$

## **Anexo VII**

### **Coeficientes de Correlação entre os parâmetros da pilha MBE**

---

Tabela 1 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros da pilha MBE

	Humidade	MO	pH	CE	COT	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nt	C/N	AT4
<b>Humidade</b>	1									
<b>MO</b>	ns	1								
<b>pH</b>	ns	-0,682	1							
<b>CE</b>	ns	ns	-0,684	1						
<b>COT</b>	0,706	ns	ns	ns	1					
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	0,807	ns	ns	-0,847	ns	1				
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1			
<b>Nt</b>	ns	ns	ns	ns	ns	-0,705	ns	1		
<b>C/N</b>	0,730	ns	ns	ns	0,984	0,717	-0,673	ns	1	
<b>AT4</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,715	-0,684	ns	1
<b>Bact. 27</b>	ns	ns	ns	ns	ns	0,750	ns	-0,757	ns	ns
<b>Bact. 44</b>	ns	ns	ns	ns	-0,745	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Lev. 27</b>	ns	ns	s	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Lev. 44</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Fung. 27</b>	ns	ns	ns	ns	-0,698	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Fung. 44</b>	-0,710	ns	ns	ns	-0,843	ns	ns	ns	-0,862	ns
<b>Fosf. Ác.</b>	0,848	ns	ns	-0,832	0,820	0,795	ns	ns	0,798	ns
<b>Fosf. Alc.</b>	0,741	ns	ns	-0,895	0,740	0,734	ns	ns	0,702	ns
<b>Celulases</b>	0,775	ns	ns	-0,959	0,733	0,891	-0,693	ns	0,749	ns
<b>Proteases</b>	0,821	ns	ns	-0,905	0,785	0,826	ns	ns	0,774	ns

n.s. - não significativo

Os coeficientes de correlação com módulo >0,6694 são significativos a  $\alpha=0,1$ ; com módulo >0,7545 são significativos a  $\alpha=0,05$ ; com módulo >0,8745 são significativos a  $\alpha=0,01$

Tabela 2 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros da pilha MBE

	Bact. 27	Bact. 44	Lev. 27	Lev. 44	Fung. 27	Fung. 44	Fosf. Ác.	Fosf. Alc.	Celulases	Proteases
<b>Humidade</b>										
<b>MO</b>										
<b>pH</b>										
<b>CE</b>										
<b>COT</b>										
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>										
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>										
<b>Nt</b>										
<b>C/N</b>										
<b>AT4</b>										
<b>Bact. 27</b>	1									
<b>Bact. 44</b>	ns	1								
<b>Lev. 27</b>	ns	ns	1							
<b>Lev. 44</b>	ns	0,701	ns	1						
<b>Fung. 27</b>	ns	0,741	ns	0,822	1					
<b>Fung. 44</b>	-0,771	0,749	ns	ns	ns	1				
<b>Fosf. Ác.</b>	ns	ns	ns	ns	ns	-0,738	1			
<b>Fosf. Alc.</b>	ns	ns	ns	ns	-0,680	ns	0,969	1		
<b>Celulases</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,934	0,944	1	
<b>Proteases</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,976	0,981	0,967	1

n.s. - não significativo

Os coeficientes de correlação com módulo >0,6694 são significativos a  $\alpha=0,1$ ; com módulo >0,7545 são significativos a  $\alpha=0,05$ ; com módulo >0,8745 são significativos a  $\alpha=0,01$